This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.
+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.
+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

UC-NRLF
$B 250 758

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

BIBLIOTECA
SCIENTIFICA INTERNAZIONALE
VOL. XXXVIII.

P. POGLIAGHI

LA TRASMISSIONE ELETTRICA DELL' ENERGIA

Con numerose illustrazioni

MILANO
FRATELLI DUMOLARD
1884.

Digitized by Google

Digitized by Google

BIBLIOTECA SCIENTIFICA INTERNAZIONALE

VOL. XXXVIII.°

Digitized by Google

Biblioteca Scientifica Internazionale

Medaglia di bronzo all' Esposizione Universale di Parigi del 1878
e Medaglia d'argento all'Esposizione Nazionale di Milano 1881

SI È PUBBLICATO:

1. Blaserna. La teoria del suono . . . . . L. 5 —
2. Balfour Stewart. L'Energia — sue forme — sue leggi — — sua conservazione . . . . . » 5 —
3. Maudsley. La risponsabilità nelle malattie mentali . . » 6 —
4. Schutzenberger. Le Fermentazioni . . . . . » 6 —
5. Vogel. Gli effetti chimici della luce e la fotografia nelle loro applicazioni alla scienza, all'arte, all'industria » 6 —
6. Jevons. La Moneta ed il meccanismo dello scambio . » 6 —
7. Draper. Il conflitto fra la Religione e la Scienza . . . » 6 —
8. Dwight-Whitney. La vita e lo sviluppo del linguaggio » 6 —
9. Berthelot. La sintesi chimica . . . . . » 6 —
10. Cooke. La nuova chimica . . . . . » 6 —
11. Vignoli. Della legge fondamentale dell' intelligenza nel regno animale . . . . . » 5 —
12. Tyndall. Nuvole, fiumi, ghiaccio e ghiacciaj . . . . . » 6 —
13. Quatrefages. La Specie umana . . . . . » 7 —
14. Secchi A. Le Stelle, saggio di astronomia siderale, con molte incisioni e 9 tavole colorate . . . . . » 10 —
15. Dumont. Il piacere ed il dolore. Teoria scientifica della sensibilità . . . . . » 6 —
16. Lombroso C. Pensiero e meteore, note di un alienista. » 6 —
17. Lockyer F. R. S. Analisi spettrale, con tav. fot. e crom. » 7 —
18. Wurtz. Teoria atomica . . . . . » 6 —
19. De Rossi. Meteorologia endogena. Vol. I, con tavole . » 7 —
    (Per il volume II vedi N. 31).
20. Bernstein. I sensi dell' uomo . . . . . » 6 —
21. Morselli prof. Enrico. Il Suicidio, Saggio di Statistica morale comparata . . . . . » 8 —

Digitized by Google

22. VIGNOLI. Mito e Scienza . . . . . L. 6 —
23. BÖHMERT. La Partecipazione al Profitto . . . . . » 7 —
24. BAIN. La Scienza dell'Educazione . . . . . » 6 —
25. CANESTRINI. La teoria di Darwin . . . . . » 7 —
26. SPENCER. Le basi della morale . . . . . » 6 —
27. FUCHS. Vulcani e Terremoti . . . . . » 6 —
28. MANTEGAZZA. Fisonomia e Mimica . . . . . » 6 —
29. SERGI. Teoria della percezione . . . . . » 6 —
30. SPENCER. Introduzione allo studio della Sociologia . . » 7 —
31. DE ROSSI Meteorologia endogena. Volume secondo ed ultimo, con 24 incisioni e 5 tavole litografate . . . . » 7 —
32. R. FERRINI e P. POGLIAGHI. La luminosità elettrica dei gas e la materia radiante . . . . . » 6 —
33. CATTANEO Dott. GIACOMO. Le colonie lineari e la morfologia dei molluschi, con incisioni e tavole . . . . . » 6 —
34. C. A. YOUNG PH. D. LL. D. Il Sole. Un vol. con molte inc. » 6 —
35. HUXLEY. Il Gambero. Introd. allo studio della zoologia. » 6 —
36. DE CANDOLLE A. L'origine delle piante coltivate. . . . » 7 —
37. BUCCOLA G. La legge del tempo nei fenomeni del pensiero. Saggio di psicologia sperimentale. Inc. e tav. litog. » 7 —

Legatura all'inglese dei primi venti volumi, cadauna . . L. 1 50

DI PROSSIMA PUBBLICAZIONE:

CANTONI G. Natura e ragione . . . . . 1 Vol.
LUZZATTI prof. L. Le leggi scientifiche del risparmio . . . 1 »
SICILIANI. La Psicologia comparata proposta come nuovo organo delle scienze politiche e sociali . . . . . 1 »
HARTMANN. L'origine delle scimmie. Trad. di G. Cattaneo. 1 »
SCOTT. Meteorologia. Trad. con aggiunte e note del Padre Denza . . . . . 1 »
LUZZATTI. Le stanze di compensazione. . . . . 1 »
SICILIANI P. La biologia nel secolo XIX . . . . . 1 »

Digitized by Google

Digitized by Google

P. POGLIAGHI

LA TRASMISSIONE ELETTRICA DELL' ENERGIA

Con numerose illustrazioni

MILANO
FRATELLI DUMOLARD
1884.

Digitized by Google

Proprietà letteraria.

MILANO, TIPOGRAFIA GOLIO.

Digitized by Google

TK 1001
P58

INDICE

CAPITOLO I. Trasformazione del lavoro meccanico in corrente elettrica . . . . . Pag. 1
» II. Le macchine magnetoelettriche . . . . . » 27
» III. Leggi fondamentali delle correnti elettriche . . . » 46
» IV. Trasmissione elettrica del lavoro meccanico . . » 65
» V. Illuminazione . . . . . » 102
» VI. Processi elettrolitici. Accumulatori . . . . . » 125
« VII. Distribuzione dell' energia elettrica . . . . . » 150
« VIII. Applicazioni — Conclusione . . . . . » 189

606

Digitized by Google

Digitized by Google

LA TRASMISSIONE ELETTRICA DELL' ENERGIA

I.

TRASFORMAZIONE DEL LAVORO MECCANICO IN CORRENTE ELETTRICA.

Il tema di queste conferenze è noto generalmente, ed è anche spesso enunciato nelle pubblicazioni scientifiche sotto una forma un po' diversa. Si parla, si scrive, si discute sulla trasmissione della forza, esprimendo con questo vocabolo un concetto che nel linguaggio scientifico moderno è reso con maggiore proprietà, dirò anche con maggior efficacia, da quello di energia e che, in questo caso particolare, dovrebbe esser per lo meno sostituito da lavoro meccanico. — Confesso di aver esitato alquanto prima di decidermi a sostituire, nel titolo stesso, l'espressione più esatta, all'altra, che è già in certo modo sanzionata dall'uso, e fissa, per lo meno, l'idea un po' vaga che si ha generalmente della cosa con una formula concreta e accettata; e l'esitazione era piuttosto accresciuta che diminuita dallo scopo istesso, modestissimo, che mi ero proposto scegliendo tra le molte quistioni che ora si presentano nel campo già così vasto delle applicazioni industriali

Digitized by Google

dell'elettricità questa che è senza dubbio tra le più importanti e le più nuove, e, diciamolo pure, tra le meno facili.

Certo che a primo aspetto, non parrebbe molto d'accordo coll'intenzione di presentare in modo accessibile a tutti un riassunto ordinato, e, per quanto è possibile, completo di un problema così vasto, l'annunciarlo con una forma che abbisogna essa stessa di schiarimento. Pure, pensandoci meglio, mi parve che, insieme a molte buone ragioni astratte che si potranno facilmente indovinare, la necessità stessa di porre in chiaro il significato del titolo fosse piuttosto un argomento per adottarlo che non per respingerlo, e che, per la maggior parte di coloro ai quali queste conferenze son dedicate, non dovrebbero riuscire inopportune le poche parole che mi trovo in obbligo di spendervi attorno. — Potranno servire per lo meno a rinfrancare le idee che per avventura si possono avere sul significato di alcune espressioni, entrate da troppo breve tempo anche nel campo scientifico perchè si possa supporle note con abbastanza sicurezza da chi non si occupa, in modo speciale, di queste materie.

Una massa pesante riposa sulla tavola, e preme su di essa colla forza di parecchi chilogrammi; la sollevo con una fune, e questa è tesa adesso dalla medesima forza; in un caso e nell'altro il peso della massa o la forza colla quale essa agisce su ciò che la sostiene è perfettamente controbilanciata dalla reazione della tavola o della fune; nell'un caso e nell'altro la forza è sempre la stessa, quantunque la massa abbia cambiato di posto. Finchè il peso rimane immobile non è possibile ottenere da questa forza un effetto qualsiasi; l'espressione comune di peso morto rende con grande efficacia tale stato

Digitized by Google

di cose, rappresenta imaginosamente l'impossibilità di produrre, mediante una tal forza, ciò che, pure con vocabolo comune, chiamiamo un lavoro. — Per sollevare però la massa in quistione dalla prima alla seconda posizione del lavoro è stato speso. Il peso ha percorso uno spazio e il movimento fu prodotto vincendo la resistenza che, per effetto della gravità, si oppone al sollevamento. — Ogni volta che si produce un movimento vincendo una resistenza si spende del lavoro, e questo lavoro è tanto più grande quanto maggiore il peso sollevato e più lungo il cammino percorso, nel caso nostro, in direzione verticale. Se la forza che preme la tavola o tende la fune non ha cambiato nei due casi le condizioni della massa da cui lo sforzo dipende sono invece mutate e di molto. Essa compie ora cadendo un lavoro; potrebbe, se non vi fossero le resistenze passive, sollevare alla medesima altezza un'altra massa eguale, o con opportuni congegni elevarne una più piccola ad altezza maggiore, od una doppia, per esempio, a metà della differenza di livello fra i punti estremi della propria caduta. La massa sollevata è dunque capace di produrre un effetto che non sarebbe stato possibile ottenere da essa finchè rimaneva immobile sulla tavola, è, diciamo, nelle nuove condizioni dotata di una certa somma di energia che prima non possedeva, che è disponibile, allo stato di potenza, o come si dice potenziale, finchè la massa sospesa rimane immobile e diventa attuale, si trasforma in un vero lavoro, appena si permetta a questa di muoversi per ricadere al posto di prima.

Come è noto oramai anche ai bambini s'è chiamato chilogrammetro il lavoro necessario per sollevare un chilogrammo all'altezza di un metro — o quello che può venir

Digitized by Google

restituito da un chilogrammo che cada dalla medesima altezza. — La massa di ferro che ci servì nell'esperienza ha richiesto, per essere sollevata a due metri di altezza, un lavoro di circa sei chilogrammetri, ed essa può restituirlo cadendo; essa è dunque in questo momento dotata dell'energia di sei chilogrammetri. Se io arresto a metà della corsa il peso che cade, esso conserverà una metà dell'energia che gli era stata comunicata dapprima, sarebbe cioè, nella seconda caduta capace soltanto di compiere un lavoro eguale a quello che si richiede per sollevare i sei chilogrammi all'altezza di un metro, o, ciò che vale lo stesso, all'altezza di due metri un peso di soli tre chilogrammi.

Precisamente come un peso sollevato, una massa d'acqua in un serbatoio, una molla d'orologio carica del vapore in una caldaia, sono altrettanti magazzini di energia, di lavoro disponibile, che si traduce in lavoro attuale quando si permette al peso o all'acqua di cadere, alla molla di svolgersi, al vapore di porre in moto lo stantuffo di una macchina. Ma in tutti questi casi, in tutti i casi possibili in natura, l'energia dovette essere immagazzinata spendendo del lavoro; in ogni caso il lavoro accumulato sarà minore del lavoro speso perchè una parte di questo è consumato dalla trasformazione; in ogni caso dovrà accadere un cambiamento nelle condizioni del corpo che restituisce una parte più o meno grande dell'energia accumulata. Il peso e la massa d'acqua cadono, la molla si svolge, il vapore si raffredda, e nelle nuove condizioni saranno ancora capaci di produrre del lavoro finchè sarà possibile un ulteriore mutamento; una caduta più in basso del peso, un raffreddamento maggiore del vapore,

Digitized by Google

una nuova distensione della molla finchè conserveranno cioè una certa somma di energia. — Energia dunque esprime nel modo il più generale, la possibilità di produrre un lavoro, qualunque siano i fenomeni che lo accompagnano e lo rivelano ai nostri sensi. — Nello stesso modo che due corpi, posti rispetto alla superficie del globo a diverso livello, sono dotati di una somma differente di energia rispetto alla gravità, così posseggono una somma differente di energia due corpi a diversa temperatura, due corpi in diverse condizioni elettriche, due corpi di diversa composizione chimica.

Si capisce subito da queste poche considerazioni come sia assolutamente inesatto il parlare di trasmissione di forza. È l'energia del vapore nella caldaia, ottenuta a spese del combustibile che brucia nel focolare, che viene trasmessa per mezzo di tubi al cilindro della macchina e che, potenziale qui come nella caldaia finchè non si apre la valvola, si trasforma in lavoro meccanico appena lo stantuffo si pone in moto vincendo le resistenze passive. Il vapore nel cilindro si raffredda, mentre che quello contenuto nel tubo si muove e riproduce nel punto opportuno le condizioni necessarie per la trasformazione successiva, trasportandovi ad ogni colpo di stantuffo una parte dell'energia che si va continuamente rifornendo nella caldaia. Dal volante della macchina una cinghia trasmette il movimento ad una puleggia. Il lavoro che si compie sullo stantuffo è rappresentato durante la trasmissione dallo sforzo che tende la cinghia fra le due puleggie e dalla rapidità del movimento. — Il sistema complesso della cinghia e delle puleggie forma, per così dire, un magazzino istantaneo di lavoro disponibile o di energia potenziale che si trasmette

Digitized by Google

alle varie macchine operatrici, ove il lavoro speso nel focolare della caldaia viene effettivamente utilizzato.

In qualunque modo si effettui una trasmissione, qualunque siano i fenomeni e le trasformazioni che accompagnano nelle varie fasi il lavoro trasmesso, essa si riduce sempre ad una trasmissione di energia, anzi sotto questa unica forma si esprime completamente il concetto generale, di cui la espressione comune comprende soltanto un caso particolare, la trasmissione del lavoro meccanico — collo stesso scambio di parole consacrato dall'uso, col quale si parla della forza di una macchina, mentre se ne esprime il valore adoperando i chilogrammetri, o i cavalli-vapore che non sono affatto misure di forza, ma bensì delle misure di lavoro o d'energia.

Ed è precisamente nel caso particolare di una trasmissione elettrica che questo modo comprensivo, e che a primo aspetto può parere un po' vago, è non solo opportuno ed esatto, ma, come vedremo di mano in mano che andremo addentrandoci nell'argomento, è, direi quasi, imposto dalle condizioni stesse del problema.

La trasmissione elettrica del lavoro meccanico, costituisce sotto un certo punto di vista la parte più importante e più nuova della quistione. Gli studi teorici e le ricerche sperimentali permisero di delinearne nettamente le condizioni, per modo che se ne possa sperare non lontana l'applicazione in molti casi particolari, e che si possa discutere con buoni argomenti la possibilità pratica di alcune idee grandiose, messe avanti fino da quando le prime macchine dinamoelettriche permisero di tentare le prime esperienze. Ma la questione si presenta sotto un aspetto doppio. Il problema fisico della trasmissione del lavoro meccanico

Digitized by Google

per mezzo della corrente, e il problema industriale della convenienza economica del trasporto e delle trasformazioni che l'accompagnano.

Ora lo scopo principale di queste conferenze essendo quello di far conoscere a qual punto gli studi più recenti abbiano portata una questione di così grande interesse industriale, mi parve che il modo più opportuno di presentar l'argomento fosse appunto quello che mi obbligasse a trattarlo sotto l'aspetto più generale e, specialmente, a porre in rilievo la parte economica, a proposito della quale, colla guida delle sole conclusioni teoriche, che riguardano la trasmissione del lavoro meccanico, si potrebbe facilmente arrivare a crearsi delle illusioni dannose, in pratica, quasi come la più ingenua ignoranza.

Presa dunque nel suo insieme una trasmissione elettrica di energia si riassume in tre punti principali: la prima trasformazione del lavoro meccanico in energia elettrica, — la trasmissione di questa per mezzo di un filo conduttore — la riproduzione all'altro estremo o lungo questo di una parte del lavoro speso all'origine sotto forma di lavoro meccanico, di lavoro chimico, di luce, o di calore che dev'essere distribuito a seconda dei bisogni, e colla assoluta indipendenza di tutti gli apparecchi alimentati dalla corrente.

Esamineremo, prima di tutto, ciascuna di queste tre parti separatamente, terremo dietro alle varie trasformazioni dell'energia, vedremo in ogni caso quali debbano essere le condizioni di lavoro degli apparecchi trasformatori onde poter poi, riunendo le varie conclusioni parziali, arrivare a farci un concetto possibilmente esatto del problema generale e della bontà relativa delle soluzioni proposte.

Digitized by Google

Ciascuna di queste tre parti richiede un esame attento e un po' minuzioso: i ragionamenti su cui si fondano le conclusioni teoriche, e quelli che ci serviranno a discuterne l'opportunità pratica attuale, e la stessa possibilità di un'attuazione futura, si collegano troppo intimamente ed in un modo troppo necessario, e colle leggi delle correnti, e con quelle che reggono l'azione delle macchine elettriche perchè si possa supporre che quelle cognizioni generali un po' vaghe, quando non sono inesatte, che si hanno su di esse abbiano ad essere sufficienti per offrire una base così solida da poter reggere sicuramente l'edificio abbastanza complesso dei ragionamenti futuri.

La novità stessa poi di questi apparecchi, l'indole dei fenomeni che vi si compiono rendono, mi pare, indispensabile di abbozzarne per lo meno a grandi tratti una specie di teoria elementare nella quale, senza entrare in dettagli troppo minuti, vedremo di esaminare accuratamente e completamente, per quanto riguarda le parti essenziali, un generatore di corrente e di farci un'idea un po' esatta del come vi avvenga la doppia trasformazione di energia che si compie col mezzo di essi.

Una macchina magneto o dinamoelettrica è composta di tre parti essenziali che possiamo osservare nel piccolo apparecchio che abbiamo sott' occhio (fig. 1). Un anello ricoperto di filo metallico isolato, avvolto, come vedremo poi, con un ordine speciale, può girare rapidamente fra i poli di una calamita, che lo circondano così davvicino da lasciare tra essi e l'anello soltanto lo spazio necessario perchè questo vi si possa muovere senza sfregamenti. Sull'asse dell'anello, e mobile insieme con lui, è fissato il collettore, un cilindretto composto di tante asticine di

Digitized by Google

metallo isolate, a ciascuna delle quali mette capo un filo che parte da un gruppo di spire avvolte sull'anello (fig. 2). Come indica il suo nome, esso raccoglie le correnti gene-

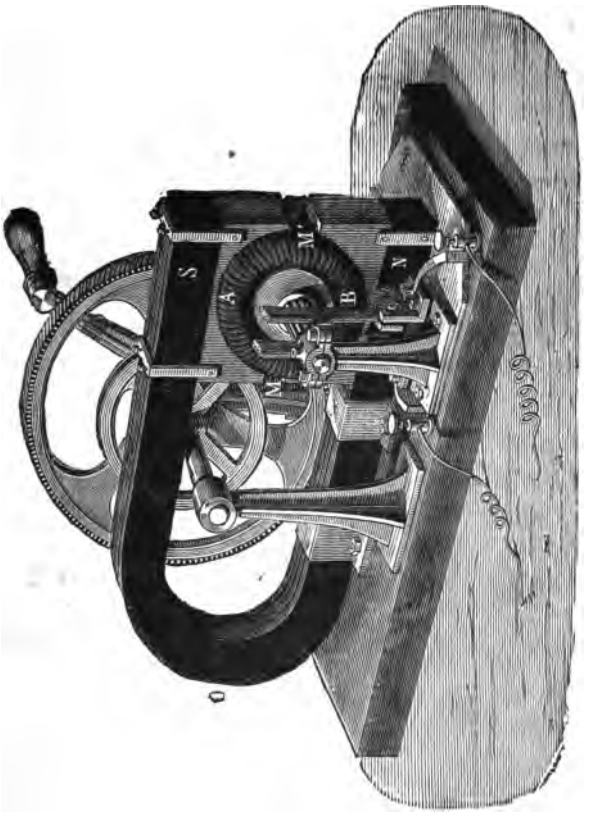

Fig 1.

rate nell'elica mobile e le lancia per mezzo delle due spazzole nel filo che vi mette capo. In qual modo la rotazione di un gomitolo di fili di rame può generare una corrente elettrica?

Digitized by Google

Lo spazio che circonda i poli di una calamita è dotato di alcune proprietà particolari che dipendono unicamente dalla presenza di questa e si manifestano con una serie di fenomeni noti all' esperienza la più comune. Una calamita attira le masse di ferro che si trovano nello spazio intorno a' suoi poli. Tra due poli magnetici si esercitano degli sforzi che sono di attrazione o di ripulsione a seconda che i poli affacciati sono contrari od omonimi. I due poli di una calamita sono sempre contrari e assolu-

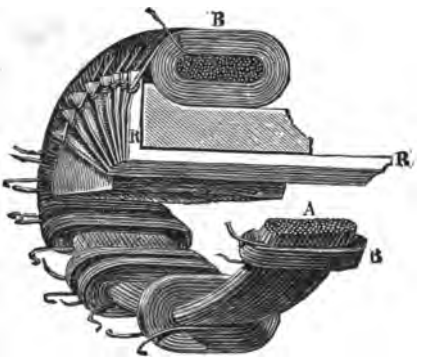

Fig. 2.

tamente inseparabili. Per rimovere la massa di ferro dalla posizione che occupa attualmente, per spinger l'uno contro l'altro i poli nord, per es., di due sbarre calamitate, per allontanare due poli contrari affacciati, bisogna vincere la resistenza opposta da questa forza, nello stesso modo che per sollevare un peso è necessario vincere la resistenza offerta dalla gravità e quindi tanto in un caso che nell'altro bisogna consumar dell'energia e compiere un lavoro.

La direzione nella quale si esercita l'azione della gravità è quella di una retta che passa per il centro della terra

Digitized by Google

pel punto, come dice il poeta, a cui si traggon d'ogni parte i pesi come se tutta la massa di questa vi fosse concentrata. Ogni particella di materia che si trovasse nello spazio circostante tenderebbe a precipitarvisi seguendo la linea retta che la congiunge al centro di attrazione, e in un punto qualunque dello spazio la direzione di queste linee ci indicherebbe quelle secondo cui bisognerebbe movere una massa perchè possa produrre del lavoro o accumular dell'energia a seconda che il movimento avviene per effetto della gravità o vincendone lo sforzo. Per quanto riguarda la gravità lo spostamento orizzontale si effettua senza richiedere alcun lavoro, senza fornire al peso alcuna somma di energia potenziale.

Vediamo di determinare del pari la direzione degli sforzi che si esercitano nello spazio che circonda una calamita perchè ci sia possibile produrre del lavoro assecondandoli, o trasformare in energia potenziale quello speso per vincerli.

Un'esperienza semplicissima, che ognuno può ripetere assai facilmente, ci permette di ottenerne una rappresentazione fedele dalla stessa calamita. Su di una lastra di vetro è sparsa della polvere minutissima di ferro di cui ciascun granello, posto nel campo d'azione d'una calamita, si magnetizza e tende a moversi nella direzione risultante dagli sforzi comuni che si esercitano su di esso contemporaneamente dai due poli. Una piccola calamita è adagiata parallelamente alla lastra di vetro contro la faccia inferiore di questa, l'azione magnetica s'esercita attraverso il vetro e la polvere si move. Battendo leggermente sulla lastra si liberano momentaneamente i granellini dall'attrito di questa; talchè li vediamo obbedire all'azione della calamita e in

Digitized by Google

pochi momenti abbracciarla con una moltitudine di magnifiche curve che irradiando dai poli dove sono più fitte, si dispongono simmetricamente all' ingiro formando una serie di linee chiuse la cui direzione diventa parallela all'asse del magnete quando attraversano la regione equatoriale (fig. 3).

Queste linee che colla loro frequenza e colla loro direzione disegnano le condizioni dello spazio intorno ad una calamita vennero chiamate da Faraday le linee di forza, e questo spazio il campo magnetico. Imaginiamo per un momento un polo magnetico, il quale, libero di moversi, sia respinto da quello che nella figura appare a destra, e che per fissar le idee supporremo un polo nord. Appena il polo libero si move respinto dall'omonimo della calamita sente l' attrazione dell'altro, il suo cammino sarà determinato dall'azione risultante per modo che, seguendo una linea di forza, il polo si allontana dal primo avvicinandosi continuamente al secondo. Come un corpo che cade il polo compie durante questo movimento un lavoro; sarà quindi necessario spenderne per movere un polo nord lungo una linea di forza in modo da avvicinarlo al polo omonimo della calamita o da allontanarlo dall'opposto; ma, rispetto alle forze del campo, il medesimo polo potrà essere, dirò così, trasportato da una linea all'altra come una massa pesante in un piano orizzontale. Nessun polo magnetico, nessuna particella di ferro tende a precipitarsi sulla calamita nella regione equatoriale, la direzione delle linee di forza ci avverte che nella regione centrale lo sforzo è parallelo all'asse del magnete e va solo inclinandosi rispetto ad esso di mano in mano che ci avviciniamo ai poli.

Il campo magnetico non circonda soltanto le calamite

Digitized by Google

permanenti come quella che abbiamo adoperato nella nostra esperienza. Una sbarra di ferro può acquistare, come è noto, le stesse proprietà per effetto d'una corrente elet-

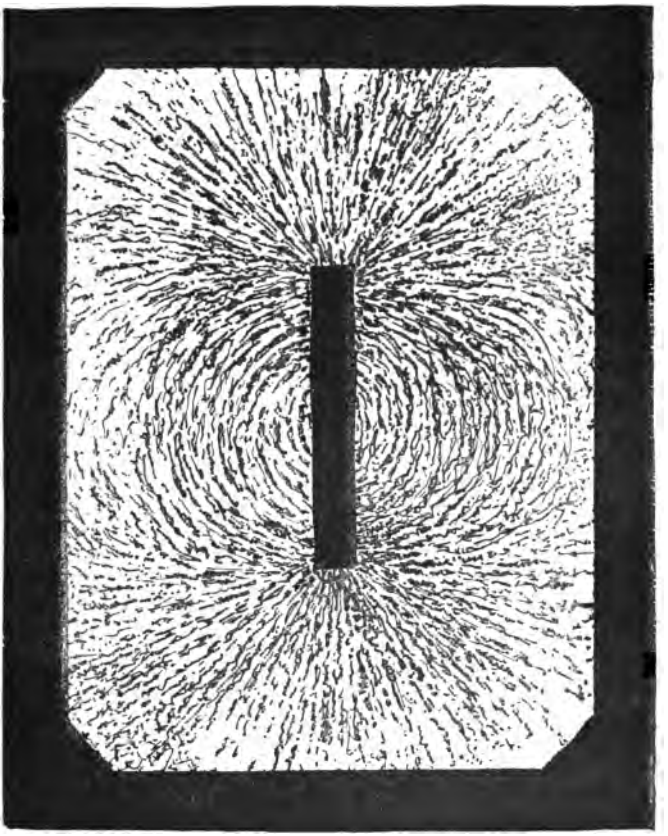

Fig. 3.

trica. Questo grosso pezzo di ferro piegato ad U è circondato da un buon numero di spire di filo di rame ben

Digitized by Google

isolato. Se girando il manubrio di un commutatore lancio una corrente nell'elica, la grossa massa che riposava prima sulla tavola, è attratta con violenza. La magnetizzazione cessa e la massa ricade appena, rimettendo il commutatore nella posizione di prima, la corrente è interrotta. Ma v'ha dippiù, due spirali di filo sottile disposte nel prolungamento l'una dell'altra, sono sospese tranquille, affatto inerti. Le vediamo immediatamente moversi deviando l'una dall'altra, come due aghi magnetici i cui poli omonimi si trovassero posti di fronte, appena siano entrambe percorse da una corrente nella direzione opportuna. Intorno ad esse si crea dunque un campo del quale con un'esperienza analoga a quella che abbiam fatta colla calamita, potremo determinare le linee di forza. — Attraverso ad una serie di fori praticati in una lastra di vetro passa un filo di rame piegato ad elica di cui l'imagine si disegna ora sullo schermo (fig. 4). Appena le spire sono percorse da una corrente la polvere di ferro, distesa come prima uniformemente sulla lastra, si move e disegna rapidamente una serie di curve simili a quelle che vedemmo intorno alla calamita (fig. 2). Intorno all'elica si forma un vero campo magnetico, ciascuna spira, ciascuna porzione di filo, il filo intero per tutta la sua lunghezza è circondato da un'atmosfera magnetica che possiamo rendere evidente ripetendo l'esperienza della polvere con un filo che attraversi normalmente la lastra di vetro. La polvere disegna anche qui le linee di forza del campo, che appaiono come altrettanti circoli concentrici col filo e che vanno diradandosi di mano in mano che se ne allontanano (fig. 5). Anche qui le linee segnano la direzione nella quale agiscono le forze del campo, ed un polo magnetico

Digitized by Google

sarebbe spinto a rotare intorno al filo in un piano normale all'asse di questo. Il movimento di un polo magnetico verrebbe dunque prodotto senza spendere nè produrre lavoro, rispetto alle forze del campo, quando avvenisse parallelamente al filo, giacchè queste non esercitano in tale dire-

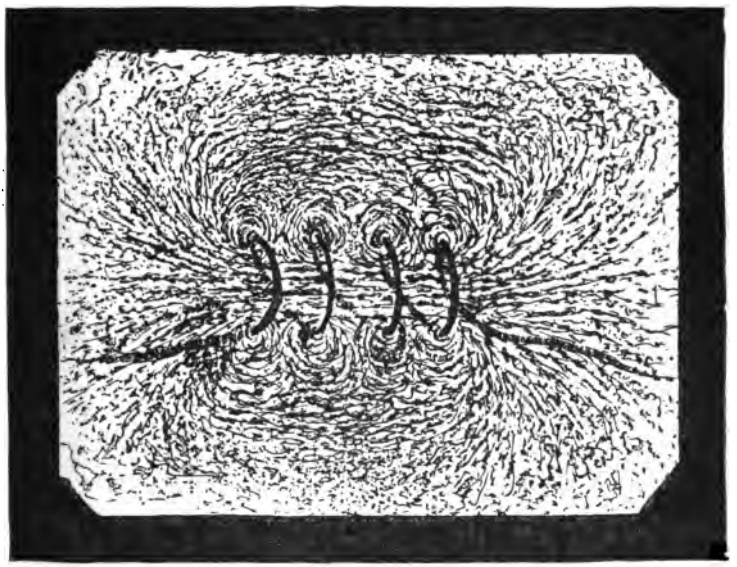

Fig. 4.

zione nessuna azione sul polo. Appoggiando un filo alla faccia inferiore della lastra la limatura sovrastante si dispone in una serie di linee rette normali alla direzione della corrente (fig. 6), nessuna particella di ferro tende a moversi secondo l'asse. Analogamente un ago magnetico sospeso e parallelo ad un filo di metallo, è deviato appena

Digitized by Google

questo è percorso da una corrente ed è spinto a collocarsi in un piano normale al filo, in posizione tale cioè che l'unico movimento possibile (in direzione parallela al filo) non può esser prodotto dalle forze del campo comunque

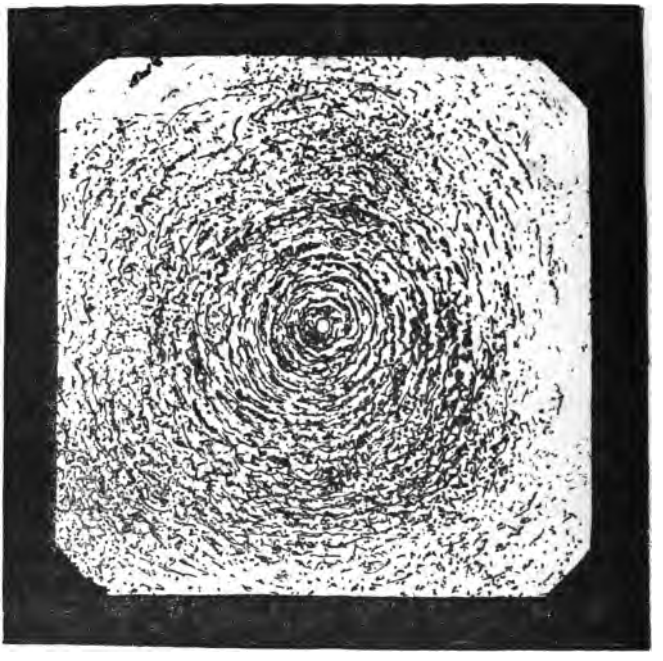

Fig. 5.

s'aumenti l'intensità della corrente. Il movimento dell'ago avviene in condizioni analoghe a quello di un pendolo. La via percorsa dal polo non coincide con nessuna delle linee di forza, ma subisce lo sforzo tangenziale di una serie di linee successive dall'una all'altra delle quali passa senza nè richiedere nè produrre del lavoro.

Digitized by Google

I fenomeni esaminati in queste esperienze ci hanno rivelato il legame strettissimo, indissolubile, che passa fra una calamita e un filo percorso da una corrente elettrica. Intorno ad entrambi abbiamo constatato l'esistenza di un campo magnetico, abbiamo determinato la direzione degli sforzi che vi agiscono, siamo riusciti se non a misurare a formarci un concetto della loro intensità nei vari punti del campo; ci è dunque possibile produrre tali movimenti che

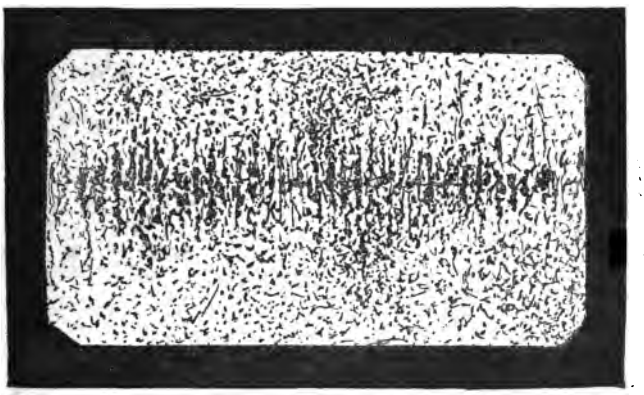

Fig. 6.

come quelli di un peso nel campo della gravità consumino o restituiscano del lavoro. E per l'analogia delle condizioni potremo stabilire fin d'ora che, tutte le volte che un movimento vien prodotto vincendo la resistenza delle forze agenti nel campo, dovremo spendere per effettuarlo una certa somma di lavoro che verrà trasformato in una quantità equivalente di energia potenziale, per mezzo della quale il lavoro speso potrà venir restituito sotto forma diversa.

Digitized by Google

La figura (fig. 7) che si disegna ora sullo schermo ci rappresenta col solito metodo l'andamento delle linee di forza tra due poli contrari affacciati, è l'imagine del campo magnetico tra i poli di una calamita a ferro di cavallo,

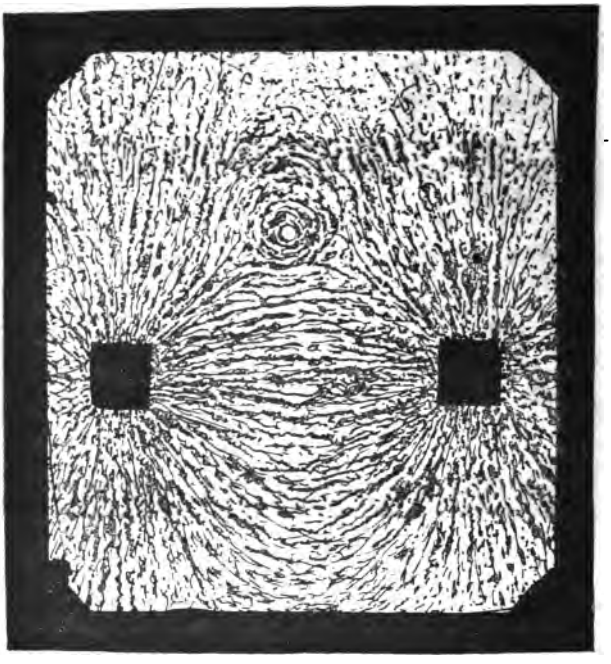

Fig. 7.

simile a quella nel cui campo vien fatto girare l'anello della nostra macchina magnetoelettrica. Attraverso ad un foro praticato nella lamina passa, normalmente ad essa, un filo di rame. Lanciandovi una corrente, esso si circonda pure di un campo magnetico le cui linee di forza si dise-

Digitized by Google

gnano intrecciandosi a quelle del campo della calamita; e per l'azione reciproca dei due campi uno sforzo di attrazione o di ripulsione si esercita fra i poli magnetici ed il filo.

Ho qui davanti a me un piccolo apparecchio assai semplice che ci permette di constatarlo effettivamente, di verificarne la direzione e la grandezza, di controllare speri-

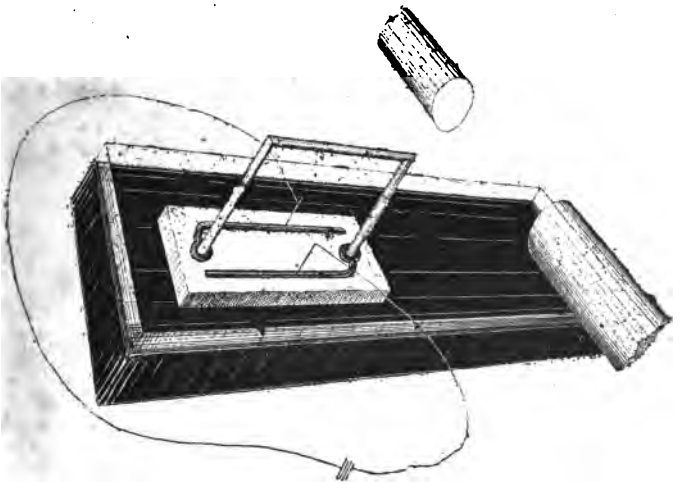

Fig. 8.

mentalmente le conclusioni già formulate e dedurne delle conseguenze importanti pel nostro argomento. Tra i due poli affacciati di un elettromagnete a eguale distanza da essi ma fuori della linea che li congiunge (fig. 8) è posto un filo di rame piegato ad U colle gambe rivolte all'ingiù e assicurato ad una base parallelepipeda di legno. Questa galleggia in una vaschetta abbastanza lunga perchè vi

Digitized by Google

possa percorrere uno spazio superiore almeno alla metà della distanza che separa i tratti verticali di filo, ed è solcata da due scanalature parallele, isolate l'una dall'altra, ciascuna delle quali mette capo ad un estremo del filo. Nelle scanalature riempite di mercurio pescano i capi d'un altro filo, per modo che, qualunque posizione assuma il sistema galleggiante, il filo ad U chiude il circuito fra i due capi immersi.

Il braccio verticale A trovasi ora rispetto ai poli dell'elettrocalamita nella stessa posizione del filo che attraversa la lamina di vetro (fig. 7). Le linee di forza dei due campi s'intrecciano e dall'azione comune risulterà un movimento del filo il quale può obbedire all'impulso. — Quale ne sarà la direzione? — Ciascun polo sarebbe spinto a ruotare intorno al filo lungo la linea di forza che lo attraversa. Lo sforzo, nelle varie posizioni, si esercita dunque secondo la tangente che passa per il polo, e, per esempio, da destra a sinistra per il polo nord, da sinistra a destra per il polo sud (fig. 9), le due direzioni sono concorrenti; il filo insieme al galleggiante si muoverà secondo la risultante dei due sforzi che si esercitano contemporaneamente sui due poli contrari. Quando questi siano di eguale intensità e disposti simmetricamente rispetto al filo, il cammino percorso da questo taglierà normalmente, attraversandole, le linee di forza sul campo della calamita, lo sforzo sarà massimo quando il filo e i due poli si trovano nello stesso piano, ed andrà diminuendo, senza cambiare direzione, di mano in mano che il filo, continuando il suo movimento rettilineo, si allontani dai poli dall'altra parte. Il senso nel quale è percorso questo cammino dipende insieme da quello della corrente nel filo e dalla disposizione dei poli; lo si inverte

Digitized by Google

cambiando l'uno o l'altro dei due elementi, rimane lo stesso mutandoli entrambi.

Le considerazioni astratte, dedotte dalle sole leggi elementari del campo magnetico, i risultati sperimentali che ne confermano l'esattezza ci mostrano come in nessuna posizione il filo sia, dalle forze del campo, sollecitato a moversi in altro senso fuorchè quello in cui la direzione del suo movimento taglia le linee di forza. E precisamente come la forza di gravità può far cadere un peso, ma è as-

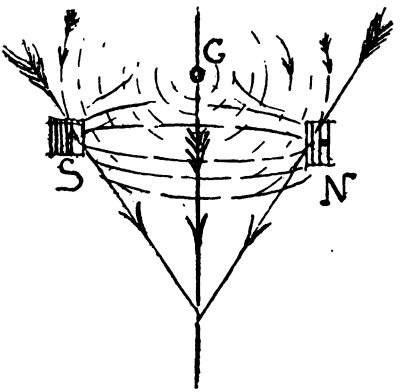

Fig. 9.

solutamente incapace di trasportarlo da un punto ad un altro di un piano orizzontale, nessuno sforzo si esercita nel campo magnetico tendente a movere secondo una linea di forza un filo che faccia parte di un circuito chiuso.

Attaccando poi al sistema galleggiante un filo sottile che, accavallandosi ad una piccola carrucola, possa reggere dei pesi, questi misureranno nelle varie posizioni la grandezza dello sforzo attivo.

Il movimento del sistema galleggiante richiede un con-

Digitized by Google

sumo di lavoro che viene fornito dalla corrente, una parte della cui energia si trasforma così in lavoro meccanico. Il filo mobile e quello i cui capi pescano nelle scanalature della base di legno formano un circuito chiuso nel quale è introdotto un elettromotore, un apparecchio cioè che trasforma in corrente elettrica una certa somma di energia, di cui una parte è impiegata, come dissi, ad ottenere il movimento. Togliamo l'elettromotore, la corrente cessa, e il movimento s'arresta, quantunque riunendo i due capi del filo il circuito rimanga chiuso come prima.

Abbiamo eliminato la sorgente d'energia senza cambiare, del resto, le condizioni generali del circuito rispetto al campo della calamita; per movere il filo posto sul galleggiante nella stessa direzione, si dovrà spendere la stessa somma di energia che era fornita, per ottener questo risultato, dalla corrente elettrica. Ma un tal movimento, ottenuto a spese di un lavoro esterno, vincendo la resistenza del campo deve trasformarsi in qualche modo in una somma equivalente di energia potenziale, per esser restituito poi come energia attuale — il filo durante il movimento è percorso da una corrente, il senso della quale deve essere tale che lo sforzo risultante dalla reazione fra i due campi della calamita e del filo si opponga al movimento che la genera; e sarà dunque diretta oppostamente a quella che, lanciata nel filo, lo spingerebbe a moversi nella direzione in cui il movimento si compie.

Questo concetto fondamentale è una delle infinite espressioni particolari del grande principio di Galileo, che ad ogni azione corrisponde una reazione eguale e contraria; è noto sotto il nome di legge di Lenz, colla scorta della quale sarà facile in ogni caso determinare il senso della

Digitized by Google

corrente o del movimento derivante dalla trasformazione elettromagnetica di una somma di lavoro.

Le condizioni particolari dell'apparecchio che abbiamo adoperato finora, non ci permettono di verificar con esso, sperimentalmente, questa conclusione capitale — la corrente generata sarebbe troppo debole per poter essere avvertita dagli strumenti di cui posso disporre. Alla calamita a ferro di cavallo sostituisco un elettromagnete diritto, molto lungo, che è circondato quando l'elica sia per-

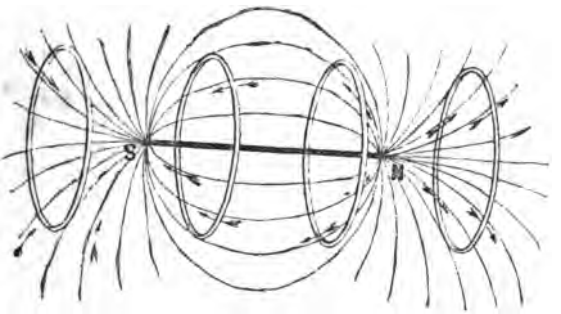

Fig. 10.

corsa da una corrente poderosa, da un campo assai intenso le cui linee di forza si dispongono come è indicato nella fig. 10. Un anello, o meglio una spirale fittissima di filo assai sottile, può scorrere parallelamente all'asse della calamita mentre i due capi liberi s'attaccano ai serrafili di un galvanometro, formando così colla spirale di questo un circuito chiuso. Dalle deviazioni dell'ago dedurremo il senso e, prossimamente, l'intensità della corrente. Cerchiamo anche in questo caso di prevedere il risultato dell'esperienza. L'anello mobile avanzandosi dalla posizione

Digitized by Google

attuale verso il polo nord dell'elettromagnete, taglia le linee di forza che irradiano da esso quasi normalmente, ma sotto un angolo tanto più vicino a 90° quanto più s'avvicina al polo. La corrente nel filo, diretta in modo da opporsi al movimento che la genera, andrà crescendo di intensità per raggiungere il valor massimo al momento in cui passa nel piano del polo; diminuisce di poi senza che ne cambi il senso di mano in mano che si avvicina alla parte centrale dove la direzione del movimento e quella delle linee di forza coincidono; questo avviene allora senza che le forze del campo oppongano resistenza; non si compia alcun lavoro e la corrente cessa. Proseguiamo nel nostro cammino. Appena che la direzione delle linee di forza cambia rispetto a quella costante del movimento dell'anello, bisogna vincere una resistenza, che va crescendo di mano in mano che le due direzioni s'incrociano sotto angoli meno acuti e una nuova corrente scorrerà nel filo seguendo le medesime fasi. Ma in quale direzione? Mentre che nella prima parte del cammino un polo nord respinto dall'omonimo della calamita avrebbe, allontanandosi da questa, attraversato l'anello dall'interno all'esterno, ora, nella regione che circonda il polo sud, avvicinandosi al polo magnetico dal quale è attratto, taglierebbe l'anello dall'esterno all'interno. Il senso delle linee di forza è dunque mutato rispetto al filo come quando, nelle prime esperienze col filo galleggiante, abbiamo invertito la polarità dell'elettromagnete e con essa il senso del movimento prodotto dalla medesima corrente, o, nel caso attuale, la direzione di quella generata nel circuito mobile.

Le indicazioni del galvanometro accompagnano fedelmente le mie parole, e mostrano come si verifichino esat-

Digitized by Google

tamente coll'esperienza le previsioni della teoria. L'ago devia verso destra dapprima, arriva ad un massimo, poi ritorna a 0° per deviare in senso opposto seguendo le medesime fasi, quando il filo oltrepassata la linea neutra, entra nel campo del polo sud.

Riassumendo potremo dunque stabilire che:

Il movimento di un filo, o, in generale, di un conduttore i cui capi siano riuniti in modo da formare un circuito chiuso, genera in questo una corrente tutte le volte che la direzione del movimento è tale da tagliare, attraversandole, le linee di forza di un campo magnetico.

La corrente sarà poi tanto più intensa quanto più sarà vicino a 90° gradi l'angolo sotto il quale le due direzioni si sottendono.

La direzione della corrente generata è sempre tale da tendere a produrre nel filo per effetto delle forze del campo magnetico un movimento opposto a quello dal quale è generata.

Se dunque, col consumo di una certa somma di lavoro meccanico si mantenesse continuamente in moto, con velocità costante, un conduttore in un campo magnetico in modo che esso ne tagliasse continuamente le linee di forza nella stessa direzione, il circuito che ne riunisse le estremità, sarebbe percorso da una corrente continua di intensità costante, tanto maggiore quanto più intenso il campo, e più grande il lavoro che si spende nell'unità di tempo per mantenere il movimento.

Un disco di rame è posto in movimento fra poli di un elettromagnete che ne abbracciano poco meno di una metà. Il campo magnetico non è eccitato, il disco gira liberamente, il circuito, i cui capi s'appoggiano a dolce sfre-

Digitized by Google

gamento l'uno presso il centro e l'altro alla periferia del disco, non è percorso da nessuna corrente. Appena si ecciti l'elettromagnete la rotazione del disco non è mantenuta che con uno sforzo considerevole, e l'ago di un galvanometro, inserito nel circuito, devia immediatamente e si mantiene costantemente deviato finchè la rotazione rimane la stessa [1]. Nel disco un lavoro meccanico continuo si trasforma continuamente in energia potenziale, generando una corrente continua che lo restituisce sotto forma di calore nel circuito. Questo apparecchio noto nella fisica col nome di disco di Faraday, o di ruota di Barlow, è una vera macchina magnetoelettrica, per mezzo della quale si può compiere la doppia trasformazione d'energia, e che, quantunque per molte ragioni che vedremo più innanzi, non può essere impiegata utilmente nella pratica, risponde pienamente alle idee teoriche e ne forma una splendida conferma.

[1] Si genera da una corrente diretta dal centro alla periferia o dalla periferia al centro secondo le disposizioni dei poli e il senso della rotazione.

Digitized by Google

II.

LE MACCHINE MAGNETOELETTRICHE [1].

Una delle più importanti per il nostro argomento tra le conclusioni che abbiamo dedotte dall'interpretazione delle esperienze precedenti è, mi si perdoni la barbara parola, l'invertibilità assoluta delle trasformazioni di energia che si possono compiere col movimento in un campo magnetico di un conduttore che faccia parte di un circuito chiuso. A seconda che questo avviene a spese dell'energia d'una

[1] L'uso, che è qualche volta un gran guastamestieri, ha diviso i generatori di corrente in due categorie. Le macchine magnetoelettriche il cui campo è dovuto a calamite permanenti e le così dette dinamoelettriche nelle quali invece l'eccitazione avviene, come vedremo parlando della distribuzione per effetto della stessa corrente generata dall'apparecchio. Vi è una terza classe di macchine nelle quali il campo è eccitato dalla corrente prodotta da un generatore indipendente e che non si saprebbe a quale delle due categorie appartenga. Per fissar le idee chiameremo dinamoelettriche soltanto quelle macchine il cui campo è eccitato dalla propria corrente; magnetoelettriche tanto quelle a calamita permanente come quelle eccitate da una corrente esterna.

Digitized by Google

corrente lanciata nel filo, per effetto delle forze del campo, o col consumo di un lavoro meccanico, il filo dell'apparecchio galleggiante o compie un lavoro attuale sollevando per esempio un piccolo peso, o riproduce l'energia che si sviluppa nella caduta di questo sotto una forma particolare complessa di energia potenziale, ciò che si esprime dicendo che il filo è percorso da una corrente elettrica.

Questa qualità preziosa dovremo necessariamente riscontrarla anche negli apparecchi industriali, giacchè dipende dalle condizioni fisiche immutabili della trasformazione. Ce ne serviremo anzi, seguendo il metodo di dimostrazione e approfittando delle ingegnose esperienze di A. Breguet, per interpretare il modo di funzionare delle varie disposizioni adottate per riuscire a produrre, mediante la rotazione di un gomitolo di fili metallici in un campo magnetico, una corrente di intensità costante, diretta sempre nel medesimo senso.

Senza entrare in dettagli troppo minuti, evitando anzi scrupolosamente tutto quello che si riferisce alla parte, dirò così, costruttiva di questi apparecchi, che ci porterebbe troppo lontani dal nostro argomento, cercherò di porre in chiaro la logica dei metodi di avvolgimento che caratterizzano i tipi più importanti di macchine elettriche e si riproducono modificati, più o meno ingegnosamente, negli apparecchi industriali. L'esame delle varie soluzioni dello stesso problema servirà intanto a ribadire nella mente i concetti teorici che siamo venuti esponendo, i quali, insieme alle leggi delle correnti elettriche di cui ci occuperemo più avanti, ci forniranno i criteri per giudicare rettamente del valore, e magari anche della possibilità pratica di molte

Digitized by Google

idee seducenti e grandiose e dei mezzi proposti per mandarle ad effetto.

Un filo di rame piegato ad *u* (fig. 11) appoggia per il punto di mezzo del braccio orizzontale su di un pernio intorno al quale può girare liberamente. L'estremo libero di ciascun ramo verticale, pesca, con un' appendice snodata, in una vaschetta piena di mercurio divisa, da una sottil parete di ebanite disposta secondo un diametro, in due parti semi-circolari, ciascuna delle quali è in comunicazione con

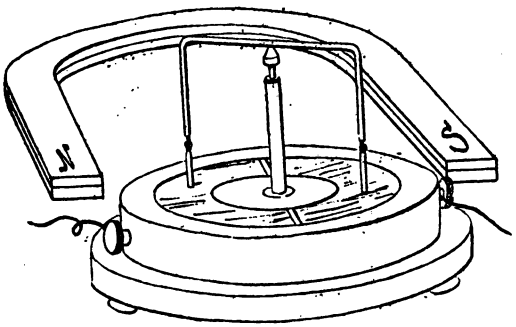

Fig. 11.

uno dei capi di un circuito, chiuso sempre, in qualunque posizione, dal filo mobile. Una calamita a ferro di cavallo è collocata in modo che i suoi poli si trovino sul diametro perpendicolare a quello delle pareti d'ebanite, ad uguale distanza dall'asse di rotazione.

Le esperienze che abbiamo fatto ci permettono di seguir l'andamento delle linee di forza nel campo; esse si stendono fra i due poli in direzione sensibilmente parallela al diametro che li unisce, attraversando quindi perpendicolarmente il piano verticale delle pareti d'ebanite.

Digitized by Google

L'unico movimento possibile del filo (di rotazione intorno all'asse verticale) qualunque sia la causa che lo produce, non avviene sempre nelle stesse condizioni rispetto alle forze del campo. I due tratti verticali tagliano le linee di forza sotto un angolo assai vicino a 90° quando si movono di fronte ai poli, mentre che la direzione del movimento tende a diventar parallela a quella delle linee di mano in mano che ci avviciniamo al diametro di separazione delle due vasche di mercurio; vengono anzi a coincidere l'una coll'altra nell'istante in cui il filo, continuando il suo giro, lo attraversa. Queste fasi si ripetono, ad ogni mezzo giro, simmetricamente sui due rami posti, come si vede, all'estremità d'un medesimo diametro.

Cambia dunque continuamente per ciascun ramo il lavoro che si richiede per mantenerne costante la velocità, cambierà pure insieme la somma di energia potenziale che si trasforma, e che, nulla, o minima, in vicinanza del diametro delle pareti, andrà crescendo durante un quarto di giro, sarà massima al diametro che passa pei poli, per poi decrescere fino ad annullarsi nella posizione simmetrica al punto di partenza. Durante il movimento ciascun ramo del filo mobile fa parte di un circuito chiuso, e sarà quindi percorso da una corrente di cui possiamo determinare la direzione colla legge di Lenz. La nostra calamita è disposta in modo che abbiamo a destra un polo nord; la direzione delle linee di forza, individuata come al solito da quella di un polo dello stesso nome, è segnata dalle freccie nella figura 12 che rappresenta schematicamente una pianta dell'apparecchio. La traccia del cammino percorso dal filo, finchè si trova nel bacino di destra, è attraversata dalle linee di forza dall'esterno all'interno, mentre che

Digitized by Google

queste la tagliano in senso opposto nella parte corrispondente al mezzo giro che esso compie pescando nel bacino di sinistra. — La corrente avrà nei due rami verticali direzioni opposte, sarà ascendente nell'uno discendente nell'altro. Ora siccome la trasformazione avviene contemporaneamente nei due rami verticali, le due correnti generate nell'unico filo si inseguono e si sommano ed una sola corrente percorre, in direzione costante, il filo i cui capi sono immersi nella vaschetta di mercurio, giacchè qualunque sia la posizione del conduttore mobile, il ramo di questo che pesca nella vaschetta di sinistra è sempre percorso da una corrente discendente, quello di destra da una corrente ascendente. Ma se non cambia la direzione, non sarà costante, se la velocità di rotazione è uniforme, l'intensità della corrente. Non sarà nemmeno, nel vero senso della parola, una corrente continua, ma una serie di correnti che con intensità continuamente variabile si succedono ad intervalli eguali, annullandosi ad ogni mezzo giro quando il conduttore mobile passa per il diametro dalle pareti, che potremo chiamare diametro di commutazione.

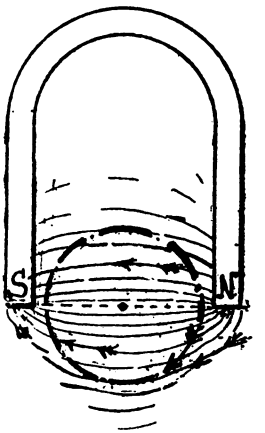

Fig. 12.

Le condizioni dell'apparecchio non permettono di constatare sperimentalmente l'esattezza dei ragionamenti fatti, e dalle conclusioni che ne abbiamo dedotte, bisognerebbe, per ottenere una corrente sensibile, imprimere al condut-

Digitized by Google

tore mobile una grandissima velocità; possiamo però, approfittando della invertibilità del sistema, riprodurre colla massima facilità le condizioni della trasformazione opposta. Una corrente continua e costante di intensità e direzione percorre il circuito esterno, e, per mezzo delle due vaschette di mercurio, passa nel conduttore mobile nello stesso senso di quella che vi svilupperebbe il movimento di rotazione. Anche in questo caso il ramo che trovasi nel settore di destra, è sempre percorso da una corrente ascendente: quello di sinistra da una discendente. A ciascun mezzo giro la corrente si inverte nel filo mobile, ed il conduttore gira continuamente, con velocità quasi costante, assorbendo dalla corrente una somma variabile di energia.

Che l'energia richiesta per mantenere il movimento sia diversa nei vari punti del percorso, possiamo constatarlo facilmente modificando leggermente l'apparecchio. Le estremità inferiori dei due rami verticali del conduttore mobile, si ripiegano e si distendono in due semi-cerchi (fig. 13), lungo ciascuno dei quali sono sospese ad intervalli uguali sei appendici mobili simili a quelle attaccate ai due capi del filo; perchè il circuito sia chiuso basta l'immersione di una appendice su ciascun semicerchio quindi la rotazione potrà essere ottenuta riducendo a poco più di $^1/_{12}$ di circonferenza l'arco abbracciato dalle fossette di mercurio; una coppia di appendici sarà sempre immersa qualunque sia la posizione del conduttore. Disponiamo ora le cose in modo che le due fossette e i due tratti verticali si trovino sul diametro di commutazione. L'unico movimento possibile nel conduttore intorno al pernio sarebbe diretto secondo le linee di forza. La reazione elettromagnetica tende invece, come abbiam visto (fig. 12), a spostarlo normalmente ad

Digitized by Google

esse lungo il diametro di commutazione. Il filo rimane immobile, tutto lo sforzo si esercita sul pernio, ed è equilibrato dalla reazione di questo, nessuna parte, o come si dice tecnicamente, nessuna componente della forza agisce nell'unico senso in cui il filo può muoversi, nemmeno la più piccola quantità di energia si trasforma. Interrompendo per un momento la corrente, faccio pescare nel mercurio la seconda appendice, il filo verticale allora non può compiere alcun movimento senza tagliare, quantunque obliquamente, le linee di forza; una componente dello sforzo che si esercita tra i due campi sempre nel medesimo senso è ancora sopportata dal pernio, mentre l'altra più piccola, ma sensibile, comincia a far rotare il conduttore assai lentamente, trasportandolo in posizioni sempre più favorevoli. Ora s'immerge la 3ª e la rotazione s'accelera per raggiungere la massima velocità quando, durante l'immersione della 4ª, il conduttore mobile percorre quella regione del campo dove la direzione delle linee di forza incontra sotto un 90° quella del suo cammino; durante questo periodo nessuna parte dello sforzo tra i due campi si esercita inutilmente sul pernio, senza trasformarsi in lavoro attuale; la trasformazione è completa e al massimo valore del lavoro ottenuto corrisponde la massima velocità.

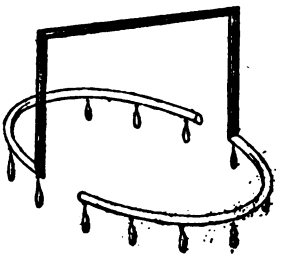

Fig. 13.

Il primo dei due apparecchi, leggermente modificato, ha fornito una delle prime soluzioni veramente industriali, conosciuta sotto il nome di armatura Siemens. Al piccolo circuito mobile piegato ad *u* sostituiamo un filo assai più

Digitized by Google

lungo piegato in modo da formare una serie di spire quadrangolari i cui lati maggiori siano paralleli all'asse di rotazione (fig. 14); i due capi del filo peschino ancora nelle vaschette semicircolari di mercurio per mezzo delle appendici snodate. — L'impulso che questa massa mobile subisce per effetto della reazione fra i due campi magnetici sarà certamente maggiore di quello che a parità di corrente sollecita il filo unico. Ogni tratto verticale agisce per proprio conto e lo sforzo complessivo risulta dalla somma di tutti gli sforzi parziali. — Quando la velocità di rotazione sia abbastanza grande perchè le ondulazioni nell'intensità della corrente generata riescano affatto impercettibili, il filo, che congiunge esternamente le due vaschette, è percorso da una serie di correnti che si succedono ad intervalli abbastanza brevi perchè si possa nella pratica ritenerla continua. Negli apparecchi pratici il circuito formato dal filo mobile e da quello fisso è chiuso nelle varie posizioni del primo dal commutatore. Ciascun capo del circuito mobile è saldato ad un pezzo metallico che sostituisce una delle vaschette di mercurio. I due pezzi, a sezione semicircolare separati da un isolatore, formano un cilindretto che ruota insieme al circuito sul medesimo asse. L'ufficio delle appendici snodate è compiuto da due laminette metalliche, o due piccole spazzole di fili metallici che restano continuamente aderenti al commutatore e raccolgono durante la rotazione la corrente dall'uno e dall'altro pezzo, i quali ad ogni mezzo giro cambiano insieme e la polarità e la spazzola che forma il contatto col circuito esterno.

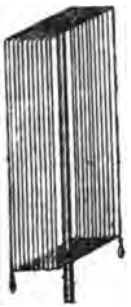

Fig. 11.

Digitized by Google

Un'altra soluzione, adottata nella macchina Brush, permette una migliore utilizzazione degli sforzi, una successione più rapida e quindi una continuità maggiore della corrente generata.

Invece che con un solo conduttore formiamo il circuito mobile con parecchi fili (4 nel nostro apparecchio) isolati l'uno dall'altro e disposti, simmetricamente, secondo i raggi di una circonferenza che abbia il centro sull'asse di rotazione. Ciascun filo termina come il primo (fig. 10) con due braccia verticali munite delle appendici snodate. S'intende da sè che, in questo caso come nei seguenti, ciascun filo dell'apparecchio dimostrativo è nella macchina corrispondente sostituito, come nell'armatura Siemens, da una serie di spire parallele. Le vaschette di mercurio che stabiliscono la comunicazione tra il circuito esterno e il conduttore mobile sono limitate a due settori dell'ampiezza di un ottavo della circonferenza, per modo che, in qualunque posizione, uno solo dei quattro circuiti mobili possa essere percorso dalle correnti, e questa passi successivamente, attraverso a ciascuno, due volte in direzione contraria ad ogni giro completo. Se le due fossette saranno disposte in modo, che ogni circuito sia percorso dalla corrente mentre si trova dirimpetto ai poli, esso sarà spinto a moversi precisamente nelle condizioni in cui è massima l'utilizzazione dello sforzo che si esercita tra i due campi della calamita e della corrente, mentre che gli altri non essendo chiusi non risentono affatto l'azione più debole della regione del campo che percorrono, e servono intanto, colla loro massa, a mantenere più regolare il movimento comunicato a tutto l'apparecchio dagli impulsi successivi. Tutti i circuiti sono attivi per un quarto

Digitized by Google

di giro, e tutti nelle medesime condizioni; una rotazione uniforme ed abbastanza rapida del sistema lancerà nel circuito che mette capo alle vaschette una serie di correnti di eguale intensità e che, succedendosi ad intervalli brevissimi, produranno praticamente i medesimi effetti di una corrente costante. — La posizione delle vaschette o praticamente delle spazzole di contatto rispetto ai pezzi del commutatore deve esser tale che, durante la rotazione, si trovino sempre immerse le appendici di quel circuito che si move tagliando normalmente le linee di forza.

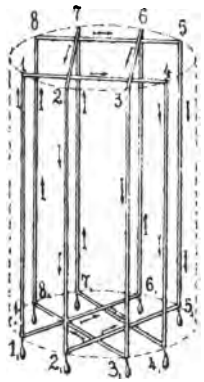

Fig. 15.

La disposizione adottata nelle macchine Siemens e nei tipi derivati, dovuta a Von Efner Alteneck, è più complicata e affatto diversa: abbiamo ancora una serie di conduttori, una serie di appendici snodate destinate a stabilire il contatto colle vaschette al momento opportuno, ma come appare dalla figura (fig. 15) essi non formano che un circuito unico, continuo e chiuso. Per comprendere facilmente il modo, come dissi, alquanto complicato col quale questo filo è disposto, pigliamo una scatola cilindrica di cui uno dei coperchi piani possa esser fatto girare. Segniamo, per fissare le idee, otto linee nere equidistanti sulla superficie cilindrica che ci rappresenteranno le 8 braccia verticali del circuito mobile, e congiungiamole a due a due con altre linee tracciate sulle faccie piane che rappresentano, (fig. 16), i tratti orizzontali. Avremo così 4 circuiti chiusi, ma indipendenti l'uno dall'altro se abbiamo

Digitized by Google

l'avvertenza di interporre una sostanza isolante nei punti in cui si incrociano. Ebbene si faccia ora rotare il coperchio superiore della scatola di $^1/_8$ di giro. Ciascun tratto orizzontale del filo trovasi di nuovo a contatto con un braccio verticale, ma invece di 4 circuiti separati, tutte le linee tracciate sulla nostra scatola formano un nastro continuo chiuso in cui i varii tratti si seguono nell'ordine indicato dai numeri posti sulla fig. 15: 1,1 - 14 - 44, - 4,7, - 7,7 - 72 - 22, - 2,5, - 5,5 - 58 - 88, - 8,3, - 3,3 - 36 - 66, - 6,1,. Ora avvolgiamo effettivamente seguendo quest' ordine un filo di rame isolato, e a ciascuna ripiegatura corrispondente ai numeri coll' indice attacchiamo una delle solite appendici mobili — avremo riprodotto identicamente il sistema che è ora imperniato sul nostro apparecchio e gira velocemente e di moto uniforme appena la corrente lo percorre.

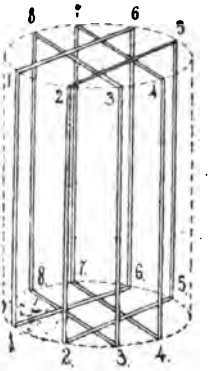

Fig. 16.

Anche in questo caso le vaschette occupano dei settori dell' ampiezza di $^1/_8$ di circonferenza per modo che, in qualunque posizione del circuito mobile, si trovino immerse due sole appendici poste alle estremità di un medesimo diametro. — Per comprendere come avvenga la trasformazione d'energia non abbiamo che a seguire la corrente quando da una qualunque (1,) delle appendici entra nel circuito e dividendosi in due parti eguali nei due fili che vi mettono capo lo percorre completamente nelle direzioni indicate dalle freccie (fig. 15) e con tale ordine che tutti i fili verticali posti da una parte, a destra, per esempio, del diametro

Digitized by Google

su cui trovansi le due appendici immerse (1, 5) la corrente è diretta in un senso, ascendente, negli altri è discendente.

Se dunque le fossette si troveranno sul diametro di commutazione in qualunque posizione del circuito mobile tutti i rami verticali saranno spinti a moversi dallo sforzo concorde tra il campo delle correnti che li percorrono e quello delle calamite, e la somma totale degli sforzi sarà sempre la stessa quantunque varii continuamente quello esercitato da ogni singolo filo.

Il movimento di un tale circuito genererà continuamente nei singoli rami verticali una serie di correnti, oppostamente dirette nelle due metà in cui il sistema è diviso dal piano di commutazione, ma che confluiranno, sommandosi, ai punti d'attacco del circuito esterno nel quale la corrente sarà costante di intensità e di direzione. Anche qui il circuito resta effettivamente aperto 8 volte ogni giro durante il brevissimo intervallo che passa fra l'emersione di un'appendice e l'immersione della successiva, intervallo che appena la velocità di rotazione è un po' considerevole e il numero dei giri del filo avvolto un po' grande diventa praticamente trascurabile.

Ed ora veniamo all'ultima soluzione conosciuta col nome di anello Pacinotti ed applicato nelle macchine Gramme e nei numerosi tipi che ne derivano. La disposizione del filo del circuito mobile è, in questo caso, collegata con una proprietà singolare delle linee di forza, di cui è necessario dir prima qualche parola e chiarire gli effetti con qualche esperienza. Se tra due poli magnetici contrari posti a sufficiente distanza perchè tra di essi si possano, colla solita polvere, disegnare chiaramente le linee di forza, si interpone prima di eccitar il campo un anello di ferro dolce, ve-

Digitized by Google

diamo che nello spazio interno a questo la polvere rimane immobile, mentre tutt'all'ingiro le linee si disegnano fitte e distinte indicando una grande intensità nei due poli affacciati (fig. 17). L'involucro di ferro difende lo spazio interno

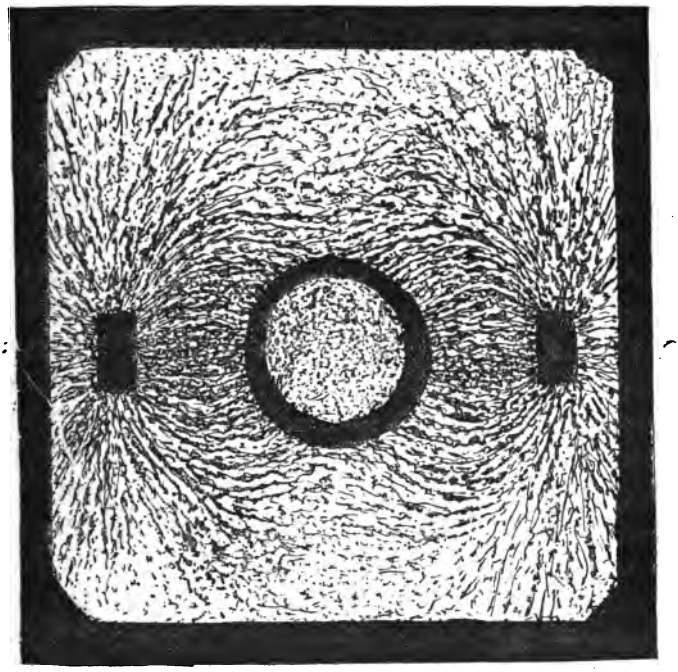

Fig. 17.

dall'azione magnetica dei poli per modo che non vi si tracciano linee di forza, non vi esistono le condizioni necessarie perchè vi si trasformi dell'energia col movimento di un circuito chiuso. Chiudendo in un involucro di ferro uno qualunque dei circuiti mobili che abbiamo esaminati,

Digitized by Google

nessuna corrente per quanto intensa può indurlo a girare, esso rimane ostinatamente fisso nella sua posizione primitiva rivelando, nello spazio che lo circonda, l'assenza assoluta delle linee di forza assorbite, per così dire, dall'involucro di ferro. Mentre che invece, esternamente all'anello, ed in ispecie nelle regioni in cui esso è più vicino ai poli le linee si fanno più fitte, il campo è più intenso che nelle condizioni ordinarie.

Ripetiamo adesso le esperienze della rotazione elettromagnetica interponendo fra i due poli un anello di ferro e piegando due volte il conduttore mobile nel modo indicato dalla figura (fig. 18). La corrente lo percorre nel senso delle freccie, e la rotazione avviene per effetto dello sforzo che si esercita tra il campo della calamita reso più intenso dalla presenza dell'anello di ferro, e quello dei due tratti esterni di filo. Anche in questo caso potremo osservare le medesime fasi, ridurre le due vaschette ad occupare un settore strettissimo, rendere uniforme il movimento collo stesso artifizio adottato nel tipo Brush, colla sostituzione, cioè, di una serie di circuiti isolati all'unico conduttore mobile che vien posto in movimento dalla corrente nel nostro apparecchio. I tratti verticali di filo interno rimangono sempre affatto inattivi e, quantunque percorsi dalla corrente alternativamente nei due sensi, non si oppongono al movimento come farebbero se le linee di forza attraversassero lo spazio limitato dall'anello di ferro. Ora è facile comprendere che l'anello di ferro sarà sempre di schermo magnetico per i fili interni anche girando purchè il suo asse di rotazione coincida coll'asse di figura. Cambiando continuamente le

Fig. 18.

Digitized by Google

parti di esso che stanno di fronte ai poli avverrà nell'interno della sua massa un lavoro continuo di magnetizzazione e smagnetizzazione, giacchè la parte che ora trovasi sotto l'influenza del polo nord dovrà, dopo un mezzo giro, magnetizzarsi in senso opposto per effetto del polo sud al quale si troverà di fronte. I poli del magnete annulare si spostano, per così dire, nella massa del magnete rimanendo fissi nello spazio e sempre di fronte a quelli della calamita del campo. Immaginiamo adesso di avvolgere intorno questo anello una elica continua di filo isolato, e in modo che ne compia il giro con 8 spire o praticamente con 8 gruppi di spire. A ciascuna di esse, o nell'intervallo di due gruppi consecutivi, sia attaccata un'appendice snodata, e le pozzette di mercurio poste ancora sul diametro di commutazione abbraccino ciascuna come nelle esperienze precedenti $^1/_8$ di circonferenza. Qualunque siano le due appendici pescanti, ad un dato momento la corrente si dividerà egualmente nelle due parti dell'elica percorrendo le spire in modo che nei rami verticali esterni di destra discenda, in quelli esterni di sinistra salga. Le condizioni dell'apparecchio riproducono esattamente quelle della seconda soluzione ed il movimento avviene con velocità uniforme, essendo anche qui costante la somma degli sforzi esercitata da tutte le parti attive del circuito mobile. Anche con questa disposizione la rotazione uniforme dell'anello genera nelle spire due serie di correnti che, dirette oppostamente nelle due metà del circuito, confluiscono precisamente là dove l'appendice snodata è immersa nella vaschetta e sommandosi percorrono il filo che la riunisce all'altra. Anche qui la corrente generata risulta da una serie di correnti separate

Digitized by Google

da intervalli tanto più brevi quanto più grande il numero delle spire e la velocità di rotazione dell'anello.

Le pozzette di mercurio e le appendici snodate sono nelle macchine industriali sostituite, come abbiamo già osservato nel caso dell'armatura Siemens, dalle due spazzole e dalle laminette del collettore. Ognuna delle quali, tanto nel gomitolo von Efner Alteneck quanto nell'anello Pacinotti, s'attacca al circuito mobile nelle identiche condizioni delle appendici sopraccitate. Queste laminette eguali in numero ai gruppi di spire ed isolate accuratamente le une dalle altre formano un piccolo cilindro fissato sul medesimo asse di rotazione dell'anello, lambito continuamente dalle spazzole, le quali, come le pozzette di mercurio, riuniscono in un solo circuito il filo mobile e quello esterno nella posizione corrispondente al diametro di commutazione, e raccolgono quindi la somma delle correnti generate dalla rotazione nelle singole spire (fig. 19).

La posizione di questo diametro di commutazione o, nel caso pratico, quella delle spazzole deve dunque esser tale che in tutte le spire poste da una parte di esso la corrente generata scorra in un senso, nelle altre in senso opposto. In altre parole il diametro di commutazione deve essere normale alla direzione delle linee di forza, giacchè deve essere a contatto colle spazzole la coppia di laminette corrispondente a quel gruppo di spire che si muove secondo le linee di forza del campo. Spostando le spazzole da una parte o dall' altra di questa posizione teorica un certo numero di spire tanto più grande quanto maggiore lo spostamento, è, per effetto della rotazione, percorso da una corrente opposta a quella che vi determina la posizione del diametro di commutazione. Dall'azione opposta delle

Digitized by Google

due correnti contrarie risulta un indebolimento della corrente totale nel circuito esterno. Ora, come si vede negli apparecchi che abbiamo sott'occhio e come avrà rimarcato chiunque abbia visto una macchina elettrica, la posizione delle spazzole non coincide con quella teorica del diametro

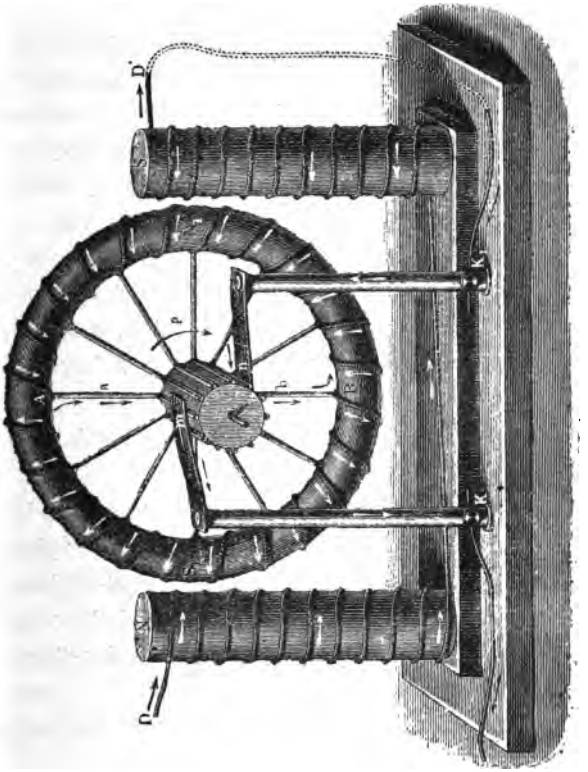

Fig. 19.

di commutazione simmetrica rispetto ai poli magnetici, ma è sempre spostata nel senso della rotazione di un angolo diverso nelle varie macchine e che viene, in ogni caso, determinato sperimentalmente, osservando in qual punto

Digitized by Google

convenga disporre le spazzole sul collettore perchè la corrente generata sia massima. Si era dapprincipio attribuito questo scarto dalla posizione teorica ad un ritardo nella magnetizzazione o smagnetizzazione dell'anello di ferro sul quale è avvolto il filo del circuito mobile in tutte le macchine elettriche, e che, tra parentesi, serve nelle disposizioni Siemens, Brush e Efner Alteneck a rinforzare il campo nello spazio percorso dalle spire, e di cui abbiam visto lo scopo teorico nell'anello Pacinotti. È un fatto provato da numerose esperienze che, come tutti i fenomeni fisici, la magnetizzazione di un pezzo di ferro richiede un certo tempo, ed era naturale il pensare che, quando la rotazione fosse abbastanza rapida, i poli dell'anello girante, invece che precisamente di contro a quelli della calamita, si trovassero alquanto spostati, e con essi la distribuzione della corrente nelle spire, che si faceva dipendere specialmente dalla successiva magnetizzazione e smagnetizzazione delle regioni corrispondenti del nucleo su cui stanno avvolte.

Alcune esperienze ingegnose di Breguet e più tardi di M. Deprez mostrarono l'insufficienza di una tale spiegazione per questo fenomeno a prima vista assai curioso e che trova la sua ragione nelle considerazioni fatte or ora sulla posizione del diametro di commutazione rispetto alle linee di forza.

Per effetto della corrente che la rotazione dell'anello ingenera nelle spire di questo la disposizione delle linee di forza del campo della calamita viene modificata. La direzione delle linee risultanti sarà diversa a seconda dell'intensità della corrente generata e quindi a seconda della velocità di rotazione e del numero di spire; in ogni caso il

Digitized by Google

diametro di commutazione dovrà essere normale alla direzione delle linee di forza in quel punto in cui questa coincida con quella del movimento di rotazione dell'anello.

Determinando col mezzo solito della polvere di ferro la forma del campo, è facile constatare come i risultati dell'esperienza concordano perfettamente con quelli suggeriti dalla teoria, e come lo spostamento delle spazzole debba esser fatta nel senso stesso della rotazione quando la macchina funziona come generatore, in senso opposto quando l'anello restituisce, per effetto della corrente che ne percorre le spire, una parte dell'energia potenziale di questa.

Digitized by Google

III.

LEGGI FONDAMENTALI DELLE CORRENTI ELETTRICHE.

Per movere o, più esattamente, nel caso pratico, per far girare nel campo magnetico esistente fra due poli contrarii un conduttore che formi parte di un circuito chiuso, bisogna spendere del lavoro.

L'anello di una macchina magnetoelettrica ruota con grande facilità sotto un impulso debolissimo finchè gli elettromagneti del campo sono inerti; al suo movimento non s'oppongono che le piccole resistenze dovute all'attrito sui perni. Ma se d'un tratto, lanciando una corrente nell'elica degli elettromagneti, riempio, per così dire, lo spazio fra i due poli di linee di forza, l'anello s'arresta repentinamente e non può esser mosso che esercitando sull'albero uno sforzo considerevole. È questo lavoro che, come vedemmo, riappare trasformato sotto una forma particolare di energia potenziale; è questo fatto che si esprime dicendo che nelle spire dell'anello si genera una corrente elettrica, la quale percorre il filo che congiunge esternamente le due spazzole del collettore.

Qual'è il significato fisico di queste parole? O, per lo meno,

Digitized by Google

quali condizioni caratterizzano questo stato particolare del circuito durante il movimento dell'armatura?

La serie svariata di fenomeni che accompagnano il passaggio della corrente in un conduttore, riproduce, sotto forme diverse, tutta l'energia che si spende per mantenere in movimento il generatore. La rotazione rapidissima dell'armatura d'una macchina elettrica il cui filo sia percorso da una corrente, la luce che brilla fra i carboni di una lampada ad arco o quella più tranquilla delle lampade ad incandescenza, come gli effetti chimici che si compiono negli apparecchi grandiosi delle industrie metallurgiche, sono tutte trasformazioni dell'energia potenziale, che deve essere espressa dalle condizioni elettriche del circuito nel quale si compiono fenomeni ora accennati.

Perchè si possa dunque acquistare un concetto esatto dell'insieme di una trasmissione elettrica di energia, dei mezzi più opportuni per effettuarla, non basta conoscere le relazioni, dirò così, numeriche che passano fra il lavoro speso da una parte e quello ottenuto dalle varie trasformazioni, ma bisogna pur anco indagare quali siano i legami che uniscono necessariamente questi lavori e lo stato potenziale del filo il quale, pari ad un canale pieno d'acqua, o ad un tubo di vapore trasmette questa energia permettendo di utilizzarla diversamente trasformata nei vari apparecchi alimentati dalla corrente.

Gli è anzi precisamente dall'applicazione logica delle leggi che esprimono questi rapporti, che deriva la soluzione teorica del problema, è dalla loro conoscenza che saremo guidati nel ricercare fin dove le conclusioni teoriche possano applicarsi praticamente, e per discutere insieme alla soluzione tecnica della questione, le condizioni che si ri-

Digitized by Google

chiedono per arrivare a quella che ne forma veramente l'importanza, la soluzione economica.

Si capisce quindi come sia necessario, anzitutto, che queste leggi siano possedute colla massima chiarezza e non si debba avere il minimo dubbio sul significato preciso dei termini che vengono adoperati per esprimerle; due cose che, generalmente parlando, non esito a dirlo, sono, per ora, allo stato di un desiderio piuttosto lontano che cercherò di soddisfare il più brevemente che mi sia possibile, perchè questa specie di introduzione non abbia a riuscire troppo estesa in confronto al resto, ma, se non altro, coll'ampiezza sufficiente perchè l'esposizione abbia ad essere, se non completa, per lo meno esatta nei punti più importanti.

L'analogia che passa fra le condizioni di un filo che chiude il circuito di un elettromotore attivo, e quelle d'un tubo percorso da un liquido ci offre un mezzo semplice e spedito per riuscire nell'intento.

Un tubo orizzontale parte dal fondo di un serbatoio pieno d'aqua, col quale può esser fatta o tolta la communicazione mediante un robinetto. Una serie di cannelli di vetro si elevano lungo il tubo tra il punto d'attacco del serbatoio e l'estremità libera pure munita di un robinetto.

Il tubo è ora pieno d'aqua, il robinetto di communicazione col serbatoio è aperto, l'altro che chiameremo di scarico è chiuso. Nei cannelli verticali l'aqua arriva allo stesso livello che nel serbatoio e, naturalmente, ci si mantiene rivelando una pressione laterale, sopportata dalle pareti e che non cambia se il primo robinetto è aperto o chiuso. Su ciascun centimetro quadrato della loro superficie, per fissar le idee, gravita un peso eguale a quello

Digitized by Google

d'una colonna d'aqua d'un centimetro quadrato di sezione e di altezza eguale alla differenza di livello fra la porzione di parete che si considera e il pelo d'aqua nei cannelli verticali, o nel serbatoio.

Supponiamo adesso che un centimetro quadrato di parete sia mobile e venga mantenuto in posto equilibrando la pressione laterale collo sforzo d'una molla. L'energia potenziale di questa produce lo stesso effetto della colonna d'aqua alla quale fu sostituita; basterebbe quindi ad elevarne un centimetro cubo a tanti centimetri d'altezza quanti sono quelli che misurano la differenza di livello tra il pelo d'aqua nel serbatoio e la porzione di parete su cui la molla agisce. Lo sforzo laterale che si esercita su tutto il tubo potremo dunque misurarlo col prodotto di questo sforzo unitario per il numero dei centimetri quadrati da cui risulta la superficie complessiva; sforzo dovuto necessariamente all'energia potenziale dell'aqua contenuta nel tubo il cui valore sarà dato dal prodotto dell'energia potenziale dell'unità di massa per il numero effettivo dei centimetri cubi della massa liquida. Se ora restando chiuso il robinetto di alimentazione apro quello di scarico l'aqua zampilla; l'energia potenziale si trasforma in lavoro attuale, il livello nei cannelli s'abbassa, la molla si distende. Il tubo contiene ancora, quando il getto è cessato, la stessa quantità d'aqua la cui energia potenziale, rispetto al piano orizzontale dell'apertura di scarico, è assolutamente nulla; la differenza fra le condizioni di prima e quelle attuali è appunto espressa dal diverso valore dell'energia potenziale dell'unità di massa, che, adesso, rispetto al piano, considerato è ridotta a zero.

Questo fattore che moltiplicato per la massa ci dà il va-

Digitized by Google

lore della sua energia potenziale, si chiama il potenziale della massa rispetto al piano da cui si parte per misurare la differenza di livello, alla quale deve esser sollevata l'unità di massa perchè la sua energia potenziale raggiunga appunto il valore richiesto; rappresenta, in altre parole, il lavoro speso per trasportare dall'uno all'altro l'unità di massa vincendo le forze del campo. Nello stesso modo che si parte dal livello del mare o da un livello qualunque fissato arbitrariamente per misurare le altezze dei monti o una differenza di livello, così si convenne di dir nulla l'energia potenziale dell'unità di massa — o il potenziale di una massa qualsiasi a livello del suolo, e chiamare addirittura il potenziale di questa massa il lavoro che si richiede per sollevare l'unità di massa all'altezza che essa occupa di fatto al momento in cui la si considera. Il prodotto di questa quantità per la massa effettivamente sollevata dà la misura dell'energia disponibile.

Ed ora che sappiamo in ogni caso misurar l'energia potenziale dell'aqua contenuta nel tubo, apriamo contemporaneamente i due robinetti di alimentazione e di scarico. Nel tubo abbiamo una corrente che produce all'estremità libera un lavoro, a spese dell'energia potenziale della massa d'aqua del serbatoio il cui livello vien mantenuto costante rimettendovi l'aqua uscente con un consumo continuo di lavoro.

Nei cannelli verticali si innalzano delle colonne liquide dalla cui altezza ricaviamo il valore dell'energia disponibile in ciascun punto del tubo. Il lavoro che vi si potrà ottenere dalla corrente, in un tempo determinato, ogni secondo, per es., sarà dato dal prodotto del valore del potenziale in quel punto per la massa d'aqua che attraversa in un se-

Digitized by Google

condo la sezione corrispondente o più generalmente di quella che attraversa in un secondo una sezione qualunque della condotta, supponendo che non vi siano perdite e sia raggiunto il così detto stato di regime. Le colonnine non hanno però tutte la medesima altezza, il livello va abbassandosi di mano in mano che ci avviciniamo al zampillo estremo; la differenza potenziale fra due cannelli consecutivi ci insegna che tra di essi l'aqua, scorrendo nel tubo, perde una parte dell'energia potenziale, che si trasforma nel lavoro necessario a vincere le resistenze d'attrito contro le pareti, attraverso le quali si disperde come calore.

La grandezza di questa parte dell'energia totale, che si converte inutilmente in calore, varia naturalmente colla resistenza della condotta. Restringendo, per es., la sezione fra due cannelli, la resistenza aumenta nel passaggio più angusto, ed in tutti i tubetti che vengono dopo il livello si abbassa insieme all'altezza del getto di scarico; l'energia disponibile è diminuita di una quantità corrispondente a quella che si trasforma nella strozzatura.

Al serbatoio, di cui manteniamo costante il livello, sostituiamo adesso una pompa premente, orizzontale, completamente sommersa in un bacino pieno d'aqua. Il tubo della condotta si ripiega in modo che l'aqua effluente dall'estremo libero ricade nel bacino il cui livello si mantiene in tal modo costante. Le dimensioni della pompa siano tali che si possa ottenere, collo stesso consumo d'energia, una corrente identica a quella che percorreva la condotta nel primo caso. A ciascun colpo di stantuffo la massa contenuta nel corpo di pompa è cacciata nel tubo, ed il lavoro che si spende a movere l'apparecchio, si trasforma in una somma equivalente di energia potenziale, che sarà anche

Digitized by Google

qui misurata dal prodotto della massa spinta nel tubo per l'energia potenziale dell'unità di massa espressa dalla differenza di livello tra il pelo d'aqua nel bacino e quello raggiunto dalla colonna che si eleva nel cannello verticale posto immediatamente dopo il corpo di pompa o, riferendoci alla pompa stessa, dalla differenza di pressione che sopporta l'unità di area sulle due facce dello stantuffo dalla quale dipende in certo modo la spinta che caccia l'aqua nel tubo. Il lavoro disponibile da un estremo all'altro della condotta, comunque lo si produca, lo si utilizzi o si disperda, può sempre venir espresso col prodotto di due fattori che rappresentano col loro insieme le condizioni potenziali della condotta stessa. Se supponiamo per un momento che la resistenza del tubo sia tale da convertire in calore tutta l'energia disponibile, rappresentata dal prodotto di questi due termini, l'aqua non zampillerà più dall'estremo libero, l'altezza delle colonnine andrà diminuendo nei cannelli successivi proporzionalmente alla resistenza del tratto interposto, per riuscire nell'ultimo allo stesso livello del pelo d'aqua nel bacino. Le condizioni della condotta non cambierebbero certo sopprimendo addirittura il bacino ed innestando direttamente l'estremo libero del tubo sul corpo di pompa, il quale verrebbe così ad essere una porzione del circuito percorso dall'aqua. — Anche in esso una parte dell'energia totale si dovrà trasformare in calore; la differenza di pressione fra le due facce dello stantuffo che moltiplicata per la massa d'aqua posta in movimento, dà il valore dell'energia trasformata, sarà necessariamente superiore a quella rappresentata dalla differenza effettiva di livello fra i due cannelli estremi, ed il prodotto di questa differenza per la massa posta in circolazione, rappre-

Digitized by Google

sentano appunto l'energia che si converte in calore nell'interno del corpo di pompa.

Queste condizioni ideali, non realizzabili quando si tratti di una condotta di liquidi o di gas, si verificano esattamente in un circuito percorso da una corrente.

Ogni gruppo di spire dell'anello Pacinotti, ogni nastro del gomitolo Siemens passa, durante una rivoluzione, attraverso una serie di condizioni diverse che si ripetono simmetricamente ad ogni mezzo giro. Lo sforzo richiesto per mantenerlo in movimento, vincendo le forze del campo, arriva partendo da un valore nullo nel piano di commutazione ad un massimo dopo un quarto di giro, quando la direzione del movimento è normale alla linee di forza, per ridiscendere e annullarsi di nuovo al secondo passaggio per il piano di commutazione.

Ed in corrispondenza a queste fasi del lavoro speso cambiano rispetto alla forza del campo i valori dell'energia potenziale immagazzinata, per così dire, momentaneamente nella spira; sensibilmente nulla durante uno spostamento nelle vicinanze del piano di commutazione, è massima per lo stesso spostamento angolare di fronte ai poli. Le due spire che si trovano contemporamente, durante la rotazione, in quest'ultima posizione sono dunque portate, rispetto alle forze del campo, ad un potenziale elevato; si crea tra esse e quelle poste sul diametro di commutazione, in corrispondenza ai punti d'attacco del circuito esterno, una differenza di potenziale simile alla differenza di pressione sulle due facce dello stantuffo. Ciascuna metà dell'anello trovasi, rispetto al circuito esterno, nelle stesse condizioni della pompa nella condotta ideale, e nello stesso modo che per effetto della differenza di pressione s'ingenera nel tubo una corrente

Digitized by Google

determinata dallo spostamento di una massa d'aqua, diciamo che il filo, di cui è formato il circuito, è percorso da una corrente capace come l'altra di restituire il lavoro che si richiede per eccitarla, e la cui energia potenziale sarà ancora misurata dal prodotto della differenza di potenziale che abbiamo ora esaminata per un altro fattore, che vien chiamato quantità di elettricità, dal cui spostamento dipende la corrente e che corrisponde, per quanto riguarda le forze del campo magnetico, alla massa del liquido rispetto alla gravità.

Anche in questo caso la differenza di potenziale esprime il lavoro richiesto per spostare, vincendo, le forze del campo magnetico la quantità unitaria d'elettricità per modo che il prodotto dell'energia potenziale ottenuto con tale spostamento per la quantità effettiva d'elettricità spostata rappresenti, in ogni caso, il lavoro trasformato dall'elettromotore.

Questa quantità di elettricità o, come vien anche chiamata, questa massa elettrica non deve essere intesa che in un senso affatto astratto; non si può per ora annettervi alcun significato fisico, giacchè l'assegnarglielo implicherebbe la conoscenza della natura intima dei fenomeni elettrici dalla quale la scienza è ancora forse molto lontana; e per la stessa ragione è necessario avvertire che l'espressione, consacrata dall'uso, di corrente elettrica, non sottintende assolutamente nulla di simile ad un trasporto di materia o di fluidi. È una formola comoda che esprime efficacemente la sintesi di un fenomeno complesso ed oscuro, mediante l'analogia con un fenomeno comune, e sopratutto lo stato caratteristico di potenzialità sotto il quale l'energia si presenta in entrambi.

Mentre possiamo farci un'idea concreta della differenza

Digitized by Google

di energia potenziale per rispetto alle forze del campo magnetico, limitiamoci a riguardare la quantità di elettricità come un termine il quale, per riguardo a questa forma di energia, si comporta nelle misure del lavoro che una corrente può fornire, precisamente come la massa rispetto alla gravità.

Nello stesso modo quindi che diciamo dipendere dalla differenza di energia potenziale sulle due facce dello stantuffo la spinta, colla quale la massa liquida è cacciata nel tubo — dalla differenza di potenziale tra le spire dell'anello dipende quella che si chiama forza elettromotrice, per la quale una determinata quantità di elettricità è posta in movimento vincendo le forze del campo in cui gira l'armatura.

Tanto in un caso come nell'altro il lavoro totale fornito dalla corrente sarà espresso dal prodotto della massa o quantità di elettricità posta in movimento per la differenza di potenziale che lo determina; il lavoro ad ogni secondo, sarà dato dal prodotto della differenza di potenziali, o della forza elettromotrice per l'intensità della corrente — o quantità d'elettricità che attraversa in un secondo una sezione qualsiasi del circuito.

Ho insistito un po' lungamente su questo argomento perchè m'è sempre parso che si abbiano a questo proposito, non dico solo dal pubblico in generale, ma anche da molti che si occupano industrialmente di questioni attinenti all'elettricità, delle idee tutt'altro che nette. — Non è, per es., troppo raro il caso di sentir vantare (per citare un caso particolare, e come si dice d'attualità), delle lampade a incandescenza come molto economiche, perchè richiedono, ciascuna, un piccolo numero di pile, ossia una debole

Digitized by Google

forza elettromotrice. Gli è come se si volesse stabilire un paragone tra l'effetto utile d'una ruota idraulica d'una turbina per il solo fatto della differenza d'altezza della caduta impiegata. La forza elettromotrice è, come l'altezza della caduta, uno degli elementi che misurano il lavoro; equivale, ripeto, alla spinta colla quale lo stantuffo preme l'aqua nel tubo; spinta che può rimanere sempre la stessa, variando come si voglia il lavoro, purchè si cambi la corsa o la sezione dello stantuffo e che può d'altra parte assumere dei valori diversissimi, rimanendo costante la somma di lavoro spesa e con essa l'energia potenziale della corrente, variando, come vedremo poi, le condizioni nelle quali questa stessa energia può venir di nuovo utilizzata.

Il suo valore dipende unicamente in una macchina magneto-elettrica dall'intensità del campo, dalla velocità di rotazione, dalla lunghezza del filo attivo del circuito mobile — la differenza di potenziale fra i due punti d'attacco del circuito esterno sarà invece, per le medesime condizioni, diversa a seconda della resistenza totale di questo e di tutto il filo che si avvolge sull'anello e che, pur non concorrendo nella trasformazione dell'energia, è percorso dalla corrente generata.

Come nel corpo di pompa e nel condotto ideale, l'energia potenziale della corrente si trasforma in calore per effetto della resistenza la quantità di calore svolta sarà nel caso particolare di una macchina dinamo o magneto-elettrica la somma di quella che si sviluppa nel circuito esterno tra le due spazzole del collettore e di quella che scalda nel filo che si avvolge sull'armatura.

La resistenza che tutti i corpi oppongono, in gradi diversissimi l'uno dall'altro, al passaggio della corrente, è

Digitized by Google

per un determinato filo, sempre la stessa, qualunque sia l'intensità della corrente, o la forza elettromotrice da cui deriva — essa esprime sempre, in ogni caso, il rapporto fra questi due termini, dimodochè raddoppiando, fra gli estremi di un conduttore la differenza di potenziale, si raddoppia l'intensità della corrente che lo percorre, triplicandola la corrente si triplica. Accoppiando questa legge, conosciuta col nome di legge di Ohm, dal nome del fisico che l'ha stabilita, colle relazioni che abbiam veduto esistere tra questi termini e il lavoro che si spende per ottenere la corrente deduciamo subito una conseguenza importantissima. Al raddoppiamento della corrente corrisponderà necessariamente un consumo quattro volte più grande di energia, quando l'intensità sarà triplicata; per aver triplicato il valore della forza elettromotrice, l'energia potenziale nel circuito avrà raggiunto un valore nove volte maggiore. E quindi, in un circuito nel quale non avvengano altre trasformazioni, la quantità di calore sviluppata aumenterà colla medesima legge proporzionalmente cioè al quadrato dell'intensità della corrente, o a quello della forza elettromotrice.

La resistenza poi cambia, per fili della medesima sostanza, a seconda delle loro dimensioni, ed è tanto più grande quanto più il filo è lungo e sottile o per esprimermi esattamente, cresce proporzionalmente alla lunghezza, diminuisce proporzionalmente alla sezione, mentre è assolutamente indipendente dalla forma del conduttore. Crescendo la resistenza, cresce per valori eguali di intensità di corrente la quantità di calore che si sviluppa; in una porzione qualsiasi di circuito è misurata dal prodotto della resistenza corrispondente per il quadrato dell'intensità, o dal

Digitized by Google

quoziente che si ottiene dividendo per la resistenza il quadrato della forza elettromotrice. E qui sorge naturalmente una domanda alla quale bisogna rispondere prima di abbandonare questo argomento con quali mezzi, e, sopratutto, con quali criteri, con quali unità fondamentali si misurano queste grandezze elettriche? — Quali rapporti le uniscono con quelle che si adoperano comunemente per esprimere un lavoro?

Il conoscere esattamente tali rapporti è, lo si capisce, altrettanto importante quanto l'avere un concetto esatto delle leggi fondamentali che siamo venuti esaminando — si può dire anzi che questi termini astratti, i quali esprimono elettricamente l'energia potenziale d'una corrente acquistano una vera importanza pratica solo quando si possa passare esattamente dal valore del lavoro che essi forniscono a quello espresso dai termini analoghi che si riferiscono all'azione della gravità — e più generalmente a quelli di una unità di forza ben determinata. Nelle esperienze che ci servirono ad interpretare il modo di funzionare delle macchine elettriche abbiamo misurato lo sforzo che si esercita tra due poli magnetici, o tra i due campi della corrente e della calamita mediante dei pesi (fig. 7). Fissiamo arbitrariamente un'unità di forza: determinando con precisione l'effetto che essa deve essere capace di produrre in circostanze ben definite. — Sia per esempio tale che agendo continuamente (come la gravità) per un secondo su di una massa determinata (un centimetro cubo d'aqua al massimo di densità) gli imprima l'accelerazione di un centimetro. — Con questa forza-tipo potremo paragonare qualsiasi forza, qualunque sia la causa che la produce. Per effetto della gravità la stessa massa acquista dopo un secondo un'accelerazione, variabile colla latitudine, e

Digitized by Google

che è in media di metri 9,81; la forza dunque colla quale il peso di un grammo preme il sostegno che lo regge è espressa da circa 981 unità. Una molla che, tesa, esercita uno sforzo pari a quello di 10 chilogrammi sarà misurata colla nostra unità astratta da 9810000.

Lo sforzo di attrazione o repulsione che, come vedemmo, si esercita tra due poli magnetici affacciati può esser misurato, come quello del peso che abbiamo adoperato nella nostra esperienza per equilibrarlo, coll'unità di forza fissata — l'esperienza mostra che questo sforzo dipende da due elementi, l'intensità propria di ciascun polo, e la distanza che li separa. Quando due poli di eguale intensità [1] posti ad un centimetro di distanza si attirano o si respingono con una forza eguale all'unità, ciascuno di essi possiede, l'unità di forza magnetica, la quale resta così espressa nello stesso modo che il peso di un corpo, o l'azione di una molla. — L'intensità di un campo magnetico è misurato in un punto qualunque dallo sforzo che vi si esercita su un polo; tutte le volte che in un campo un polo magnetico di intensità 1 sarà spinto a moversi da una forza 1, il campo avrà in quel punto l'intensità 1. — Un campo siffatto rappresenterà l'unità di campo magnetico espressa, come si dice, in funzione dell'unità fondamentale di forza.

Ed ora non è difficile passare alla misura della forza elettromotrice, che, come vedemmo, rappresenta sempre una certa somma di energia.

---

[1] L'intensità di due poli si può constatare facilmente misurando lo sforzo d'attrazione dell'uno e repulsione dell'altro nelle medesime condizioni.

Digitized by Google

Anche qui l'esperienza ha mostrato che tra i due estremi del circuito mobile il valore della forza elettromotrice dipende dall'intensità del campo, dalla velocità colla quale il filo vi si muove, dalla lunghezza del conduttore che taglia attraverso le linee di forza. Supponiamo, per semplificar le idee, che il movimento avvenga sempre in tal direzione da tagliare normalmente le linee di forza del campo [1]. — In quali condizioni corrispondono alla forza elettromotrice unitaria? Evidentemente quando in un campo magnetico uniforme di intensità 1, si muoverà con velocità costante di un centimetro al secondo, un conduttore della lunghezza di un centimetro. — Tutte le unità adoperate dipendono direttamente dall'unità di forza, e i valori di questo primo termine dell'espressione elettrica dell'energia sono espresse colle medesime unità di lavoro che verrebbero adoperate ad esprimere il potenziale di una condotta d'aqua.

Ci rimangono ora da trovare i valori unitari delle altre due quantità che sono unite alla forza elettromotrice dalla legge di Ohm, l'intensità della corrente e la resistenza. Per effetto di questa stessa legge fondamentale quando una di queste venga determinata, il valore dell'altra ne deriva necessariamente. Avremo l'intensità 1 di corrente in un filo di resistenza 1, tra i cui estremi vi sia la differenza di potenziali unitaria, o viceversa quando la forza elettro-

[1] È facile passare da questo caso a quello di una rotazione come è il caso delle macchine elettriche avvertendo che quando le due direzioni formano tra loro un angolo diretto di 90° alla lunghezza vera del filo bisogna sostituire la proiezione nella direzione normale. — Varia effettivamente la lunghezza di conduttore attivo.

Digitized by Google

motrice unitaria determina in un conduttore una corrente di intensità 1, questo avrà l'unità di resistenza.

L'intensità di una corrente elettrica si misura colla deviazione di un ago magnetico — o, per restare nel nostro ordine di idee, si misura dallo sforzo col quale il campo della corrente tende a muovere il polo lungo una linea di forza. Ora una corrente che percorra un circuito di forma circolare esercita su un polo posto nel suo centro uno sforzo che dipende dall'intensità della corrente, dal raggio del cerchio e dall'intensità del polo. — L'unità di intensità, sarà quella percorrendo un anello di un centimetro di raggio che spinge il polo 1, posto nel centro con una forza 1. E se in questo circuito la corrente sarà generata dalla forza elettromotrice unitaria esso avrà necessariamente la resistenza 1.

Senza entrare in altri dettagli che richiederebbero uno sviluppo assai maggiore dell'argomento, accontentiamoci di osservare, come, con questo metodo si possano riunire in un solo sistema di misura uniforme, e fondato su elementi perfettamente determinati, tutte le manifestazioni di energia fisica per ciascuna forma della quale si otterranno delle espressioni equivalenti del lavoro coi prodotti dei valori corrispondenti espressi colle unità particolari derivate logicamente da quelle fondamentali di massa, di spazio e di tempo.

Questo sistema di misure è conosciuto sotto il nome di sistema assoluto, e viene indicato, secondo il costume inglese colle lettere C. G. S. — centimetro — grammo — secondo — che sono le tre unità primitive da cui discendono tutte le altre unità derivate. — « La parola assoluto, per « citare testualmente il rapporto della Commissione del-

Digitized by Google

« l'Associazione Britannica, è adoperata solamente in op-
« posizione a relativo e non si deve intendere che queste
« misure siano fatte con una precisione particolare, nè per
« unità assoluta, un'unità di costruzione perfetta; in altre
« parole, adoprando i termini assoluti o unità assolute, il
« comitato dell'Associazione Britannica che le propose, volle
« soltanto indicare che queste misure invece di essere sta-
« bilite con un semplice paragone della quantità da misu-
« rarsi con una quantità della medesima specie sono rife-
« rite a delle unità fondamentali la cui nozione è ammessa
« come un assioma, sul cui valore non può nascere alcun
« dubbio, e che è sempre facilmente verificabile. »

Per unità pratiche furono scelti onde evitare dei numeri incomodi nelle calcolazioni, dei multipli più o meno grandi delle unità teoriche; così l'Ohm, unità pratica di resistenza definita da quella di rocchetti di filo campione, a determinata temperatura, o, secondo le decisioni del congresso degli Elettricisti di Parigi, da quella di una colonna di mercurio di un millimetro quadrato di sezione, a 0^0 gr. cent., di cui verrà determinata sperimentalmente la lunghezza, equivale a 10^9 unità elettro-magnetiche C. G. S. di resistenza.

Il volt, unità pratica di forza elettromotrice equivale a 10^8 unità teoriche C. G. S. di potenziale o assai prossimamente a 1.02 della forza elettromotrice di un elemento Daniell.

L'ampère o l'intensità di corrente prodotta dalla forza elettromotrice di 1 Volt in un circuito di 1 Ohm di resistenza equivale a $^1/_{10}$ dell'unità teorica C. G. S. di intensità.

Il coulomb unità di quantità è la quantità di elettricità che passa in un secondo in un circuito percorso dalla corrente unitaria di 1 ampère.

Digitized by Google

Il prodotto dunque della forza elettromotrice espressa in volts per l'intensità espressa in ampères, darà in voltampères l'energia potenziale della corrente espressa in unità assolute C. G. S. e per le relazioni che passa fra le unità fondamentali del sistema assoluto e quelle comunemente adoperate ad esprimere il lavoro — il chilogrammetro — basterà per passare da un sistema all'altro introdurre il coefficente che dipende dalla diversa unità di forza adoperata e che come vedemmo non è altro che il valore dell'accelerazione di gravità.

Nella tabella seguente sono riuniti e le espressioni più importanti e i loro valori in unità assolute o in chilogrammetri.

Forza elettromotrice E $\times$ Intensità della corrente I = Energia EI.

$\frac{\text{Forza elettromotrice}}{\text{Resistenza}}\ \frac{E}{R}$ = Intensità I. *Legge d'Ohm.*

$\text{Intens.}^2 \times \text{Resist. } RI^2 =$ } Calore sviluppato nella porzione di circuito di resistenza R. *Legge di Joule.*

$\frac{\text{Forza elett.-motr.}^2}{\text{Resistenza}}\ \frac{E^2}{R} =$ } E è la differenza potenziale agli estremi della porzione considerata.

E (in volts) I (in ampères) = Energia in misure assolute c. g. s.

$\frac{\text{E (in volts) I (in ampères)}}{9.81}$ = Energia in chilogrammetri.

$\frac{\text{E (in volts) I (in ampères)}}{75 \times 9.81}$ = Energia in cavalli al secondo.

$\frac{E^2}{R425 \times 9.81} = \frac{\text{R (in ohm) I}^2\text{ (in ampères)}}{425 \times 9.81}$ = calore svilupp. c.s. in calorie

Con queste formole elementari, e queste unità di misura possiamo esprimere elettricamente in cavalli l'energia tra-

Digitized by Google

sformata da una macchina, l'energia potenziale di una corrente — col mezzo delle due leggi fondamentali di Ohm e Joule, conosciamo i rapporti che legano fra loro le varie grandezze elettriche. Entriamo adesso definitivamente nell'argomento esaminando, colla scorta di queste cognizioni, il modo di agire dei vari apparecchi trasformatori dell'energia di una corrente in che modo la somma di energia trasformata dipenda dalle condizioni di questa e quanta parte di essa sia possibile trasformare nei vari casi.

Digitized by Google

IV.

TRASMISSIONE ELETTRICA DEL LAVORO MECCANICO.

1. — *Rendimento elettrico.*

La possibilità di ottenere del lavoro meccanico dall'energia potenziale di una corrente, di trasmettere quindi per mezzo di questa, e utilizzare a distanze considerevoli dalla sorgente una parte del lavoro assorbito dalla prima trasformazione, è una conseguenza immediata e importantissima invertibilità delle macchine magneto e dinamo elettriche — quella preziosa qualità, che ci permise fin dal principio di studiarne sperimentalmente il modo di funzionare dal punto di vista più generale.

Accoppiamo due macchine in un solo circuito in modo che la corrente generata nell'una passi nell'anello dell'altra; le due trasformazioni si compiono contemporaneamente, insieme all'altra inevitabile che dipende dalla resistenza del conduttore e ne eleva la temperatura. — Quali fenomeni particolari le accompagnano? In che modo ne vengono modificate le condizioni elettriche del circuito? Quanta parte dell'energia totale della corrente si può raccogliere e utilizzare come lavoro meccanico?

Digitized by Google

Alcune esperienze ci porranno facilmente in grado di rispondere a queste domande che racchiudono l'essenza, per così dire, della quistione. Sull'albero della seconda macchina è assicurato un freno il quale, carico di pesi, equilibra lo sforzo che si esercita tra il campo degli elettromagneti e quello del filo, l'anello rimane immobile, la corrente passa nelle spire come se il campo magnetico non esistesse, e tutta l'energia si converte in calore nel circuito. Una porzione di esso, anzi più sottile e più resistente del resto, raggiunge una temperatura abbastanza elevata per arroventarsi. Alleggerisco il freno, i due sforzi sull'albero non si equilibrano e l'anello comincia a moversi lentamente compiendo un lavoro a spese dell'energia della corrente. L'intensità, indicata dalla deviazione di un galvanometro diminuisce senza che abbiano mutato nè le condizioni di lavoro del generatore nè la resistenza complessiva del circuito. — Di mano in mano che il peso del freno diventa più piccolo, la rotazione dell'anello si va facendo più rapida, l'intensità della corrente più debole finchè, raggiunto il massimo di velocità, togliendo completamente il freno dall'albero, l'intensità della corrente è ridotta ad una piccola frazione del valore primitivo e la porzione di filo sottile, quantunque ancora assai più calda del resto, non è più rovente.

Le condizioni elettriche del circuito hanno cambiato, l'intensità attuale della corrente non è più espressa dal rapporto fra la forza elettromotrice e la resistenza che rimasero durante l'esperienza sempre costanti; la diminuzione d'intensità è dovuta unicamente alla trasformazione che si compie nella macchina, la cui armatura è posta in movimento dalla corrente e che con un vocabolo ora-

Digitized by Google

mai accettato chiameremo macchina ricettrice, o ricettore, per distinguerla dall'altra che si indica col nome di generatore.

Da quali cause dipende questo cambiamento che pone il circuito in condizioni apparentemente contrarie alla legge fondamentale di Ohm?

Osserviamo contemporaneamente il senso della rotazione nel ricettore e quello della deviazione dell'indice che rivela la direzione della corrente nel circuito. Entrambe avvengono da sinistra a destra. Approfittiamo della invertibilità ed adoperiamo il ricettore come generatore di corrente, movendone l'anello in modo che la rotazione avvenga ancora nel medesimo senso, da sinistra a destra. L'indice del galvanométro deviando da destra a sinistra ci avverte che nel circuito scorre generata dal movimento dell'anello una corrente contraria a quella che lo produce nella prima esperienza, rimanendo eguale la direzione e volendo anche il valore dello sforzo sull'albero, che è fornito nel primo caso dalla corrente, nel secondo dalla cinghia di trasmissione.

Fatta astrazione per un momento dalla causa che determina il movimento, e supponendo in entrambi i casi eguali il numero dei giri e l'intensità del campo magnetico, tra i due attacchi del filo esterno, tenderà a prodursi nel primo, si produrrà effettivamente nell'altro la stessa differenza di potenziale, che genera in questo una vera corrente rivelataci dalla deviazione del galvanometro, in quello determina soltanto un indebolimento della corrente principale. A parità di condizioni sappiamo che la forza elettromotrice d'una macchina aumenta col crescer della velocità dell'anello; e la diminuzione dell'intensità è appunto mas-

Digitized by Google

sima quando è massimo il numero dei giri. E se, esercitando sull'albero del ricettore uno sforzo in direzione tale che s'aggiunga a quello del campo, se ne aumenta la velocità, la forza elettromotrice contraria diventerà sempre più grande e, indebolendo continuamente l'intensità della corrente nel circuito, potrà, come accade ora, ridurla a zero. — Se le due macchine adoperate fossero assolutamente identiche, eguali le intensità dei campi magnetici, sull'albero di ciascuna si eserciterebbe l'identico sforzo, i due anelli farebbero lo stesso numero di giri al minuto e la rotazione avverrebbe senza esigere maggior lavoro che se il circuito fosse aperto.

Appena dunque l'anello del ricettore si pone in movimento, l'intensità della corrente diminuisce appunto per effetto della legge fondamentale di Ohm, giacchè il nuovo valore esprime il rapporto fra la differenza delle due forze elettro-motrici e la resistenza costante del circuito. — In ciascuna macchina si crea per così dire separatamente una differenza di potenziale, che dipende soltanto dall'intensità del campo magnetico, dalla velocità dell'anello e dal numero delle spire o meglio dalla resistenza del circuito attivo. Nell'intero circuito l'intensità della corrente dipende invece dal valore assoluto della forza elettromotrice risultante dalla differenza delle due opposte. Ed il lavoro che si trasforma, in senso diverso, in ciascuna macchina sarà misurato dal prodotto delle singole forze elettromotrici per l'intensità comune della corrente che percorre le spire di entrambi gli anelli e il circuito esterno.

Esaminiamo ora le diverse condizioni di lavoro delle due macchine nelle varie fasi dell'esperienza. L'intensità del campo magnetico rimane sempre la stessa tanto nel-

Digitized by Google

l'una che nell'altra — gli elettromagneti sono eccitati dalla corrente fornita da un elettromotore indipendente. Alla velocità costante dell'anello corrisponde nel generatore un valore costante della forza elettromotrice, e quindi, necessariamente, vi si trasforma una somma di energia sempre più piccola di mano in mano che, scemando l'intensità della corrente nel circuito, diminuisce il prodotto di questa per la forza elettromotrice o l'energia potenziale equivalente al lavoro trasformato. Rimanendo costante il numero dei giri dell'albero, andrà dunque continuamente diminuendo il lavoro per ogni giro, e quindi lo sforzo che, durante una rivoluzione, si esercita sull'albero motore. Dall'altra parte di mano in mano che si alleggerisce il freno è pure minore l'energia che si spende ad ogni giro dell'albero, ma va però intanto crescendo la velocità di rotazione.

Senza occuparci, per ora, del valore assoluto dei due lavori, osserviamo che la differenza fra di essi diventa di mano in mano più piccola o, in altre parole, una frazione sempre più grande dell'energia potenziale della corrente che si sviluppa nel generatore è trasformata, nel ricettore, in lavoro meccanico, giacchè diventa sempre minore in corrispondenza alla diminuzione di intensità, la quantità di calore che si sviluppa in pura perdita nel circuito totale, la cui resistenza non cambia. In ogni caso la somma del lavoro equivalente a questa quantità di calore (misurata dal prodotto del quadrato dell'intensità per la resistenza) e di quello trasformato dal ricettore, deve essere eguale all'energia rappresentata dal prodotto della forza elettromotrice del generatore per l'intensità della corrente. Le condizioni della trasmissione diventano sempre mi-

Digitized by Google

gliori elettricamente, quanto più grande è la forza elettromotrice contraria del ricettore.

Ed ora che conosciamo, per così dire, il meccanismo intimo della trasformazione, ripetiamo l'esperienza sotto una forma diversa, imaginata da M. Deprez.

Disposte ancora le macchine come prima, carichiamo il freno posto sull'albero del ricettore, di un peso determinato, e facciamo in modo che lo sforzo per ogni rivoluzione, rimanga costante, comunque vari la velocità. Il lavoro fornito al secondo sarà misurato dal prodotto di questo lavoro unitario per il numero dei giri compiuti e crescerà con essi. Mantenendo sempre costanti i due campi magnetici, comincio a movere l'anello del generatore assai lentamente. Al piccolo consumo di lavoro corrispondono, nel generatore una debole forza elettromotrice, nel circuito una corrente di poca intensità, e nel ricettore uno sforzo tra i due campi magnetici che non basta a vincere quello del freno.

La deviazione dell'indice del galvanometro, posto come prima nel circuito, misura intanto l'intensità della corrente, mentre che un altro indice, spostandosi sul quadrante di un voltmetro o misuratore di forza elettromotrice, ne segna i valori tra i poli del generatore. Aumentiamo gradatamente la velocità di questo crescono insieme la forza elettromotrice, e per la legge di Ohm, l'intensità della corrente; nel ricettore uno sforzo sempre più grande fra i due campi magnetici tenta, ancora invano, di vincere la resistenza che si oppone al movimento dell'anello.

I due indici proseguono parallelamente il loro cammino sui rispettivi quadranti finchè l'intensità ha raggiunto un tal valore che lo sforzo del freno è superato e la trasfor-

Digitized by Google

mazione dell'energia potenziale in lavoro meccanico comincia. Immediatamente, a cagione della debolissima forza elettromotrice inversa che si sviluppa nel ricettore per il lento girar dell'anello, l'indice del galvanometro retrocede alquanto, e s'arresta sulla decima divisione mentre che l'altro è rimasto immobile sulla dodicesima, che aveva raggiunto al momento in cui la rotazione ebbe principio. Il generatore fa in questo punto 180 giri al minuto, e il ricettore nel medesimo tempo arriva a stento a compierne 20. Continuiamo, senza cambiar la carica del freno, a crescere la velocità del primo: la forza elettromotrice aumenta, mentre che l'intensità della corrente rimane costante, ma diventa continuamente più rapido il movimento del ricettore. Crescono insieme il lavoro assorbito dal generatore e quello restituito dal ricettore senza che muti l'intensità della corrente e quindi la quantità di calore sviluppato in pura perdita nel circuito totale.

La velocità del generatore è adesso quasi dieci volte più grande, l'indice del voltmetro oscilla tra le divisioni 130 e 135 mentre che quello del galvanometro si sposta leggermente tra la decima e la dodicesima, e l'anello del ricettore compie quasi 900 rivoluzioni al minuto. Insieme alla forza elettromotrice del generatore cresce dunque quella contraria nel ricettore, con tal proporzione che rimanga costante il valore della loro differenza, dalla quale dipende l'intensità invariata della corrente.

In entrambe le macchine il lavoro, trasformato in senso inverso, è misurato elettricamente dal prodotto di questa intensità per la rispettiva forza elettromotrice, e il rapporto di questi due lavori espressi da

Digitized by Google

$$\frac{\text{Forza elettromotrice inversa del ricettore} \times \text{Intensità di corrente}}{\text{Forza elettromotrice diretta del generatore} \times \text{Intensità di corrente}}$$

o più semplicemente

$$\frac{\text{Forza elettromotrice inversa}}{\text{Forza elettromotrice diretta}}$$

chiamasi il *coefficente di rendimento elettrico* della trasmissione sempre espresso da una frazione che sarà tanto più prossima all'unità quanto minore sarà l'energia che si converte inutilmente, ma necessariamente, in calore nel circuito esterno. Il valore assoluto di questa differenza o della quantità di calore corrispondente, non dipende che dalla intensità della corrente necessaria per determinare il movimento dell'anello del ricettore. È chiaro che diminuendo per esempio lo sforzo del freno col togliere dal piatto una parte dei pesi, la reazione fra i due campi del filo e dell'elettromagnete raggiungerà più presto, cioè con una intensità minore di corrente il valore richiesto per vincerlo e da quel momento in poi si manterrà, come nella prima esperienza, costante. Lo stesso effetto potremo ottenerlo aumentando l'intensità del campo magnetico l'impulso che vince lo sforzo del freno dipende dall'azione reciproca del campo e della corrente ed il valore sufficiente sarà raggiunto con una minore intensità di uno degli elementi quanto più grande sarà quella dell'altro. È appunto il lavoro equivalente a questa quantità di calore che bisogna pur spendere in ogni caso per mantenere la corrente, e che dipende unicamente dalle condizioni interne delle due macchine che M. Deprez chiama il prezzo dello sforzo statico, con una espressione felice, la quale rende sinteti-

Digitized by Google

camente il concetto che questo lavoro si impiega appunto a vincere lo sforzo continuo, costante del freno.

Ed ora che ci siam fatti un'idea sintetica della doppia trasformazione, esaminiamola più davvicino colla guida di una semplicissima costruzione grafica imaginata dal prof. S. Thompson.

Quando nel circuito di una macchina dinamoelettrica tutta l'energia potenziale della corrente si trasforma in calore, il prodotto della forza elettromotrice per l'intensità è numericamente eguale a quello del quadrato di questa per la resistenza totale del circuito (quella della macchina compresa) o, per la legge di Ohm, al quoziente che si ottiene dividendo per la resistenza totale il quadrato della forza elettromotrice [1].

Se su di una retta A B segniamo (fig. 20), a partire da A, una lunghezza che rappresenti il valore della forza elettromotrice — per esempio un millimetro ogni 10 volts — l'area del quadrato A B C D, espressa in decimi di millimetro quadrato, divisa per la resistenza espressa in Ohm, darà l'energia potenziale della corrente, o il lavoro trasformato dal generatore. Se cambiamo la velocità di rotazione dell'anello, cambia la forza elettromotrice, diventa, per es., A E l'area del quadrato A E F G, e anche in questo caso proporzionale al lavoro speso, per ottenerne il valore dobbiamo pure dividerne il valore numerico, espresso nello stesso modo, per la resistenza ch'è rimasta ancora quella di prima.

---

[1] Chiamando al solito E la forza elettromotrice I l'intensità della corrente, R la resistenza.

$$E\,I = R\,I^2 = \frac{E^2}{R}$$

Digitized by Google

Finchè la resistenza complessiva del circuito non cambia le aree dei quadrati i cui lati rappresentano, colla stessa unità di misura lineare, il valore della forza elettromotrice, ci danno dei numeri proporzionali al lavoro del generatore, e paragonabili fra loro. All'area doppia corrisponde un doppio valore dell'energia, il lavoro trasformato cresce proporzionalmente al quadrato della forza elettromotrice.

Si supponga ora di cambiare la resistenza complessiva aumentando, per esempio, quella del circuito esterno. Se l'anello gira con tale velocità da mantenere la forza elettromotrice allo stesso valore di prima, l'intensità della corrente sarà necessariamente minore, e quindi più piccola l'energia trasformata che risulta dal loro prodotto.

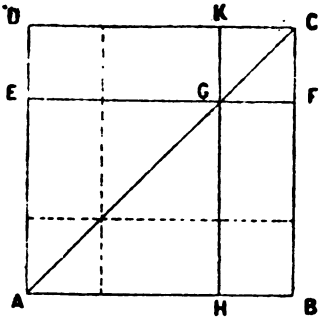

Fig. 20.

Per ottenere in queste nuove condizioni un diagramma paragonabile al primo, un quadrato cioè di tale area che stia coll'altro nello stesso rapporto dei due lavori, bisognerà rappresentar la forza elettromotrice con un' unità di misura diversa, più piccola perchè il lato del nuovo quadrato deve esser più corto dell' altro. Siccome esprimendo la forza elettromotrice nei due casi colla stessa unità di misura, s' avrebbero due quadrati eguali, da ciascuno dei quali si dedurrebbe il valore effettivo del lavoro dividendone l'area per il valore numerico della resistenza totale, basterà per ottenere due aree che differiscano del rapporto voluto, che le unità di misura colle quali si espr-

Digitized by Google

mono le forze elettromotrici siano proporzionali alle radici quadrate delle resistenze [1].

Togliamo adesso, come abbiam fatto nella prima esperienza, i pesi dal piatto del freno posto sull'albero del ricettore. Senza cambiar la resistenza cambiano, come sappiamo, le condizioni generali del circuito — l'intensità della corrente, invece che dal rapporto fra la forza elettromotrice costante del generatore e la resistenza totale, è espressa da quello che passa tra questa resistenza e la differenza fra le due forze elettromotrici diretta ed inversa. Il lavoro che si compie in ciascuna macchina, invece che al quadrato della propria forza elettromotrice sarà proporzionale al prodotto di questa per la differenza fra i due valori, la quale divisa per la resistenza, esprime l'intensità della corrente [2].

Costrutto ancora il quadrato A B C D (fig. 20) il cui lato rappresenta la forza elettromotrice del generatore sia A E il valore attuale della forza elettromotrice inversa, espressa naturalmente colla stessa unità di misura. E D sarà il va-

---

[1] Se chiamiamo con R e R_1 le due resistenze i due lavori saranno

$$\frac{E^2}{R} \text{ e } \frac{E^2}{R_1}$$

il lato di ciascun quadrato perchè le loro aree stieno nello stesso rapporto dei lavori dovrà essere

$$\frac{E}{\sqrt{R}} \quad \frac{E}{\sqrt{R_1}}$$

[2] Essendo $\underline{E}$ ed $\underline{e}$ le due forze elettromotrici contrarie, l'intensità della corrente nel circuito è espressa da $\frac{E - e}{R}$ e quindi

$$E\ I = E\ \frac{(E - e)}{R}$$

Digitized by Google

lore della loro differenza — rappresenta cioè la forza elettromotrice risultante, dalla quale per la legge di Ohm, dipende l'intensità attuale della corrente. Tracciata dal punto E la parallela al lato D C, l'area del rettangolo D E F C risulta appunto dal prodotto della forza elettromotrice del generatore per la differenza tra questa e quella del ricettore — rappresenta dunque, in questo caso, il lavoro che si compie nel generatore. Dal punto G in cui la E F incontra la diagonale A C, conduciamo la H G K parallela al lato C B. Anche qui la G H rappresenta la forza elettromotrice inversa mentre che la G F = F C è uguale alla differenza fra le due — l'area del rettangolo G K B F, ci dà dunque, espressa colla stessa unità di misura il lavoro del ricettore. Il quadrato G F C H, differenza fra le aree dei due rettangoli, non è altro che l'espressione del lavoro equivalente al calore che si sviluppa nel circuito totale — è il quadrato della forza elettromotrice risultante da cui dipende l'intensità della corrente.

L'area A B C D, rappresenta dunque il lavoro del generatore quando il ricettore è inattivo, la forza elettromotrice contraria è nulla, e tutta l'energia si converte in calore nel circuito. Appena la seconda trasformazione incomincia il punto G, che coincideva con A, si sposta lungo la diagonale A C. Quando è giunto in G_1 (fig. 21) mentre la forza elettromotrice A D del generatore è rimasta costante, quella del ricettore sarà A E_1 e l'area G_1 K_1 B F_1 l'energia che si trasforma in lavoro meccanico; mentre che quella trasformata in corrente dal generatore si riduce all'area E_1 D C F_1 ed il calore nel circuito anzichè dall'intero quadrato A B C D è espresso dall'area minore G_1 K_1 C F_1 —

Digitized by Google

di mano in mano che alleggerendo il peso del freno, cresce la velocità del ricettore, e con essa la forza elettromotrice inversa, il punto G si avvicina sempre più a C; cambiano i valori assoluti delle aree esprimenti i singoli lavori. — Quello del generatore diminuisce continuamente, mentre l'altro cresce, dapprima, per decrescere poi, diventando però sempre minore tra l'uno e l'altro la differenza.

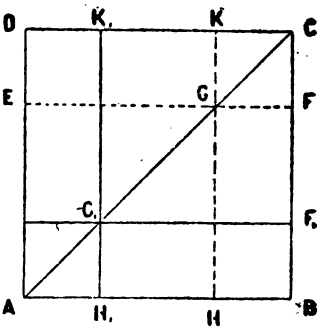

Fig. 21.

Seguendo il punto G lungo la diagonale, troviamo subito per qual valore della forza elettromotrice inversa, il lavoro del ricettore è massimo (fig. 22), evidentemente quando l'area che lo rappresenta è quella del quadrato $G_{\prime\prime}$ $H_{\prime\prime}$ B $F_{\prime\prime}$ che, come è noto, è il massimo valore del rettangolo, inscrivibile nel triangolo A B C. La forza elettromotrice inversa è allora la metà di quella del generatore — l'intensità della corrente è pure la metà di quella che percorreva il circuito prima che il ricettore cominciasse a moversi. Il lavoro del generatore è espresso dall'area $E_{\prime\prime}$ $F_{\prime\prime}$ C D, è pure ridotto alla metà, ed il coefficiente di rendimento il rapporto fra le due aree $G_{\prime\prime}$ $H_{\prime\prime}$ B $F_{\prime\prime}$: $E_{\prime\prime}$ $F_{\prime\prime}$ C D, fra i due lavori è a

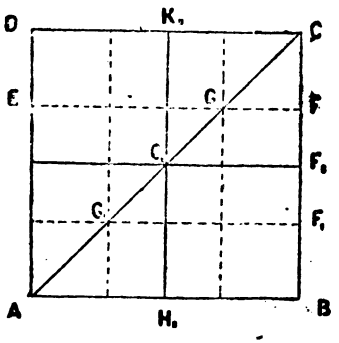

Fig. 22.

Digitized by Google

sua volta $^1/_2$. — Una metà soltanto dell'energia trasformata dal generatore viene restituita come lavoro meccanico dal ricettore, l'altra si consuma come calore nel circuito. Al di là di questo punto i valori assoluti dei due lavori continuano a diminuire, ma con essi decresce l'intensità della corrente, la loro differenza diventa minore, ed il coefficiente di rendimento, più grande; una frazione più alta del lavoro del generatore si trasforma nel ricettore. — Finchè però la forza elettromotrice del generatore si mantiene allo stesso valore, misurata dalla A B non è possibile trasmettere con un rendimento superiore al 50 % che un lavoro minore di quello misurato dall'area E $G_{\prime\prime}$ $H_{\prime\prime}$ B $F_{\prime\prime}$, la quale non è che $^1/_4$ della A B C D, del lavoro cioè che la stessa macchina sarebbe capace di trasformare in corrente colla stessa resistenza totale di circuito, quando fosse applicabile al circuito la legge di Ohm, quando cioè la quantità di calore che vi si sviluppa rappresentasse integralmente l'energia potenziale della corrente generata.

Aumentiamo adesso, come abbiam fatto nella seconda esperienza, la velocità al generatore o l'intensità del suo campo magnetico, e quindi la sua forza elettromotrice, diventi A *b* doppia di A B (fig. 23). — Il lavoro massimo che può venir trasmesso col rendimento del 50 % è quattro volte più grande A B C D = 4 (A $H_{\prime\prime}$ $G_{\prime\prime}$ $E_{\prime\prime}$), ed un lavoro eguale a quello che, colla forza elettromotrice A B veniva trasmesso con una spesa doppia d'energia, e con una produzione di calore rappresentata dall'area $G_{\prime\prime}$ $F_{\prime\prime}$ C $K_{\prime\prime}$ può venir ora raccolto sull'albero del ricettore spendendo nel generatore soltanto il lavoro espresso dall'area *d c f e* — che differisce dalla *g f h b* soltanto del piccolo quadratello *g f c k*.

Digitized by Google

La macchina generatrice è in queste nuove condizioni capace di trasformare in energia elettrica colla stessa resistenza del circuito una somma di energia quattro volte più grande — e può trasmettere i medesimi lavori di prima con rendimento assai più elevato.

Lo stesso aumento di forza elettromotrice possiamo ottenerlo raddoppiando il numero delle spire dell'anello mobile cambiando quindi la resistenza del circuito. — Anche in questo caso avremo migliorate le condizioni della trasmissione. Ma la nuova forza elettromotrice, doppia della prima, dovrà essere espressa con una unità di misura diversa, per modo che la retta che la rappresenta non avrà la lunghezza doppia della A B — e l'area del quadrato che esprime il massimo lavoro di cui la macchina è capace, nelle nuove condizioni sarà minore di quattro volte l'area A B C D.

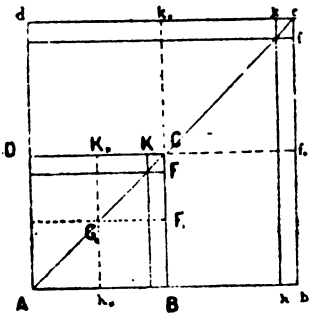

Fig. 23.

Il vantaggio che, in questo caso, si potrà ritrarre dall'aumento di forza elettromotrice sarà tanto più grande quanto maggiore sarà la resistenza della linea che congiunge le due macchine in confronto alle resistenze interne di queste. Supponiamo per un momento, che la somma delle due resistenze sia piccolissima in confronto a quella del filo esterno; l'unità di misura che si adopera per esprimere il nuovo valore della forza elettromotrice differisce di pochissimo dall' altra, e la A B sarà assai prossimamente il doppio di A B. Se invece la resistenza interna fosse di molto

Digitized by Google

superiore a quella esterna, talchè questa si potesse ritenere trascurabile di fronte alla prima, la nuova intensità dovrà essere espressa in una unità di misura il cui rapporto colla prima sarà poco diverso di $\frac{1}{\sqrt{2}}$ La A *b*, sarà ancora maggiore di A B, le condizioni della trasmissione avranno migliorato, ma sarà minore la differenza tra le seconde e le prime.

A parità dunque di forza elettromotrice una macchina sarà tanto più vantaggiosa quanto più piccola sarà la resistenza interna. Il valore massimo del lavoro che si può trasmettere con rendimenti elevati, per un determinato valore della forza elettromotrice, diventa tanto più piccolo quanto maggiore è la resistenza delle macchine o, in altre parole, il coefficiente di rendimento col quale si può trasmettere lo stesso lavoro, colla medesima forza elettromotrice ed a pari resistenza del circuito esterno è tanto più basso quanto più grande la resistenza interna della coppia di macchine colle quali si effettua la trasmissione.

Ci è anzi facile, dopo quanto abbiam detto, di determinare il valore dell'uno e dell'altro, quando siano conosciuti gli elementi, o, come si dicono, le costanti delle macchine. Ogni macchina elettrica, come tutti gli apparecchi industriali, vien costrutta, quantunque non sempre nel modo più opportuno, per raggiungere un dato effetto — per trasformare nel caso nostro, nelle condizioni ordinarie di lavoro, una somma determinata d'energia in una corrente di data forza elettromotrice. Il valore più o meno grande del lavoro trasformato, quando tutta l'energia si converte in calore, dipende da quello della resistenza complessiva del circuito, per modo che le condizioni di lavoro normali di una macchina non si possono dire completamente de-

Digitized by Google

terminate che quando, supponendo, per il momento invariabile l'intensità del campo magnetico — o nel caso più generale per un valore determinato di questa — quando dico, si conosca la forza elettromotrice che vi si sviluppa per un dato numero di giri e l'intensità della corrente corrispondente ad una data resistenza del circuito. — Accoppiamo per il momento due macchine riunendole con un conduttore di resistenza trascurabile, un filo corto e grosso di rame senza eccitare il campo magnetico del ricettore. — Per un determinato valore della velocità nel generatore si sviluppa la forza elettromotrice che dipende dalla intensità del campo magnetico e dalla resistenza dell'anello. — Il lavoro trasformato può essere espresso dal solito quadrato, o dal rapporto

$$\frac{E^2}{R} \quad \frac{\text{quadrato della forza elettromotrice in Volt}}{\text{resistenza totale in Ohm}}$$

La resistenza totale del circuito è in questo caso quella delle due macchine, ha cioè il minimo valore possibile in una trasmissione di lavoro meccanico. — Eccitiamo adesso il campo magnetico del ricettore; per ogni valore della forza elettromotrice del generatore il rendimento del sistema cambia colla resistenza del circuito complessivo, giacchè da essa dipende la quantità di calore che si sviluppa a detrimento dell'effetto meccanico. Il massimo rendimento dunque che si può raggiungere in ogni caso con una coppia di macchine è determinato dalla resistenza interna di queste e se ne ottiene il valore numerico calcolando il calore che vi si sviluppa nelle condizioni normali di lavoro.

Digitized by Google

Nelle condizioni del massimo lavoro trasmesso, un quarto del lavoro totale che può sviluppare il generatore a ricettore inattivo, si converte in calore nel circuito — possiamo esprimere questo lavoro con un rapporto analogo all'altro:

$$\frac{E^2}{4R} \quad \frac{\text{quadrato della forza elettromotrice}}{\text{quattro volte la resistenza totale}}$$

che, ripeto, è in questo caso particolare la somma della resistenza delle due macchine. — Se al filo corto e grosso di resistenza nulla ne sostituisco uno più lungo, più sottile, e di resistenza tutt'altro che trascurabile rispetto a quella delle due macchine, aumenta il denominatore della frazione che esprime il lavoro, il valore assoluto di questo diminuisce. — Il massimo lavoro dunque che potrà venire trasmesso con un sistema di due macchine elettriche è dato dal quoziente tra il quadrato della forza elettromotrice del generatore e il quadruplo della resistenza totale interna del circuito; o, in altre parole, il numero che risulta dividendo il quadrato della forza elettromotrice del generatore (in Volt) per quello che esprime in unità assolute il quarto del lavoro da trasmettere deve essere minore della somma (in Ohm) delle resistenze interne delle due macchine e tanto più dovrà esserne lontano quanto più grande la distanza alla quale la trasmissione deve effettuarsi, giacchè con essa aumenta necessariamente la resistenza totale, in base alla quale bisogna fissare, potendo, la forza elettromotrice necessaria per ottenere dei rendimenti elevati. Per trasmettere adunque con rendimenti elevati, a grandi distanze, delle somme conside-

Digitized by Google

revoli di energia, non basta trasformarle in correnti di grande forza elettromotrice, ma bisogna che questi valori elevati siano raggiunti con resistenze interne relativamente basse e quindi facendo girare rapidamente l'armatura in campi magnetici intensissimi.

Alcuni numeri, prima di concludere, mostreranno ancor meglio l'importanza di queste considerazioni. Mentre, per esempio, nelle grandi macchine Edison destinate alle stazioni centrali di illuminazione, le quali colla resistenza interna di appena 0.007 Ohm, danno una forza elettromotrice di 110 Volts, soltanto $\frac{6}{100}$ dell'energia totale vengono assorbiti in pura perdita dallo scaldamento dell'armatura, nelle macchine Brush, che sono pure tra le migliori, e danno con 23 Ohm di resistenza interna una forza elettromotrice di 2200 Volts, il consumo per la stessa causa raggiunge il $\frac{12}{100}$; in alcuni tipi di macchine Gramme, nelle quali una forza elettromotrice di 70 Volts è ottenuta con 0.21 Ohm, il calore che si sviluppa nell'anello rappresenta nientemeno che il $\frac{22}{100}$ dell'energia totale.

Accoppiando dunque due macchine eguali per una trasmissione di energia, mentre con apparecchi in condizioni per lo meno analoghe alle Edison si potrebbe ottenere un rendimento massimo teorico di 88 %, per le Brush si avrebbe soltanto il 76 %, per le Gramme del tipo considerato il 52 % — il valor massimo assoluto del lavoro che potrebbe in ogni caso venir trasmesso col rendimento $^1/_2$ essendo in ogni caso espresso dal quarto del rapporto $\frac{E^2}{R}$, dove E è la forza elettromotrice e R la somma della resistenza delle macchine.

Digitized by Google

Riassumendo dunque brevemente: concludiamo, che non è possibile, in nessun modo, trasmettere elettricamente con un determinato valore di forza elettromotrice una somma di lavoro meccanico, superiore ad un quarto di quella che il generatore è capace di trasformare in energia elettrica quando questa, a pari resistenza di circuito, si converte completamente in calore.

Il valore assoluto di questa energia massima dipende per ogni macchina dalle condizioni particolari di lavoro, dal rapporto cioè tra la forza elettromotrice e la resistenza del circuito. Il valore assoluto del massimo lavoro trasmesso è dato dal quoziente del quadrato della forza elettromotrice per il quadruplo della resistenza totale, ed in ogni caso si ottiene nel ricettore spendendo nel generatore un lavoro doppio, ossia con un rendimento del 50 %.

Col medesimo valore della forza elettromotrice e della resistenza totale si possono ottenere dei rendimenti più elevati trasmettendo dei lavori proporzionatamente minori; in ogni caso però il limite massimo del rendimento, per una data forza elettromotrice, è determinato dalla resistenza interna delle due macchine accoppiate — valore teorico non raggiungibile che quando la resistenza interna del filo di congiungimento sia nulla.

Tanto il valore assoluto del lavoro massimo, quanto quello del massimo rendimento, e quindi anche quello del lavoro che potrà venir trasmesso con un rendimento compreso fra questi due limiti estremi, dipende, a pari resistenza del circuito, dalla forza elettromotrice del generatore, e sarà tanto più elevato quanto più sarà grande il valore di questa — ed a parità di forza elettromotrice, sarà tanto più alta quanto minore la resistenza delle due macchine accoppiate.

Digitized by Google

Il limite di distanza, al quale può esser trasmessa, con un filo comunque sottile, una somma qualsiasi d'energia, dipende soltanto dal valore della forza elettromotrice che si potrà raggiungere nella prima trasformazione.

La trasmissione dunque di grandi somme di energia a grandi distanze perchè possa essere fatta con rendimenti elettrici elevati e con conduttori di dimensioni possibili, esige l'impiego di correnti di intensità relativamente piccola in confronto ai valori della forza elettromotrice. Le condizioni generali della trasmissione saranno tanto migliori quanto più intensi i campi magnetici delle due macchine, grande la velocità colla quale vi si muovono le spire, e bassa la resistenza; l'intensità della corrente non dipende dalla quantità assoluta di energia trasmessa ma soltanto dalle condizioni particolari delle macchine e del circuito; a parità delle altre condizioni è tanto più piccola per una coppia di macchine quanto più intenso il campo magnetico del ricettore.

Se però il rendimento è indipendente dalla resistenza del circuito esterno e quindi dalla distanza che separa le due macchine e dalla somma di energia trasmessa, le condizioni elettriche del filo conduttore non rimangono certamente le stesse in ogni caso. Quando la trasmissione si effettua con grande forza elettromotrice, esse sono, rispetto ai corpi circostanti, pari a quelle d'un canale posto a grande altezza sul livello del suolo, o meglio di un tubo nel quale una massa d'aqua venga spinta con enorme pressione: l'energia disponibile in un punto qualunque, sarà tanto più grande quanto maggiore la differenza di livello fra il canale ed il suolo, o la pressione laterale sulla parete del tubo — la piccola massa d'aqua che scorre nell'uno e nell'altro è

Digitized by Google

portata ad un potenziale elevato. Nello stesso modo il filo si trova, rispetto ai corpi circostanti, nelle condizioni di un conduttore carico a potenziale elevato, che bisogna isolare con cura perchè non avvengano delle scariche, le quali rappresentano sempre una perdita di energia, possono essere pericolose quando la forza elettromotrice sia molto grande e danneggerebbero irreparabilmente le macchine quando si verificassero fra le spire dei circuiti mobili.

2. *Rendimento industriale.*

La soluzione teorica del problema è dunque completa; le condizioni generali sono perfettamente definite e si possono in ogni caso calcolare numericamente i risultati che derivano dalle disposizioni generali, e dai valori dei singoli elementi.

Fin dove, e con quali avvertenze queste conclusioni, questi calcoli, si potranno applicare praticamente? Quali sono i limiti entro i quali bisogna pure che si racchiuda il problema industriale nel campo sterminato che è aperto dalla teoria? E, prima di tutto, quale rapporto passa fra il rendimento elettrico di cui ci siamo occupati esclusivamente finora, ed il lavoro effettivamente speso da una parte e realmente raccolto dall'altra? Qual'è in una parola il costo inevitabile della doppia trasformazione?

Riservandomi di rispondere più ampiamente alle prime questioni quando avrò dato qualche cenno delle altre trasformazioni di energia, mi preme adesso di porre in evidenza un fatto il quale non sarà certamente sfuggito a chi m'abbia seguíto fin qui.

Il primo limite posto dalla pratica ai risultati così larghi

Digitized by Google

della teoria è quello della forza elettromotrice che si potrà raggiungere dalle macchine trasformatrici nelle condizioni opportune per ottenere dei buoni rendimenti, cioè con resistenze interne molto basse. La soluzione ingegnosa imaginata fino dal 1878 da Thomson e Houston di Filadelfia per il trasporto dell'energia della cascata del Niagara a parecchie centinaia di chilometri di distanza, se ebbe il merito di bandire per sempre alcune idee assurde [1] non fu che il primo passo tentato sulla via teorica che, grazie agli studi più recenti abbiamo potuto percorrere completamente. I due professori del Franklin Instituite pensarono di aumentare indefinitamente il salto di potenziale fra i capi del circuito esterno accoppiando per i poli opposti una serie abbastanza numerosa di macchine. Le singole forze elettromotrici si sommano; aumentando quindi proporzionatamente la resistenza esterna, la corrente non cambia di intensità mentre crescono col numero dei generatori accoppiati l'energia trasmessa e la distanza che li separa dai ricettori. Ma nello stesso tempo aumenta la resistenza interna e si restringono sempre più i limiti del coefficente di rendimento. Oltre a ciò, come accade del resto anche per altre forme di energia fisica, la trasformazione effettuata coll'accoppiamento di molti piccoli generatori è in condizioni economiche assai svantaggiose rispetto a quella ottenuta con grandi macchine; sono minori con queste a pa-

[1] È noto come nelle prime discussioni succitate dalle esperienze di Fontaine nel 1876 si sostenesse che per una simile trasmissione d'energia non sarebbero bastati gli immensi depositi di rame della regione dei laghi per fornire il metallo necessario a fabbricare il conduttore.

Digitized by Google

rità di lavoro fornito le spese di impianto, di costruzione, di manutenzione, e, come vedremo or ora, le perdite inevitabili che dipendono dalla natura stessa degli apparecchi trasformatori. L'avvenire è senza dubbio alle macchine potenti, ma soltanto delle esperienze accurate sulle condizioni teoriche di queste, sui mezzi di isolamento, potranno insegnare a quale distanza si trovino i limiti estremi, e quale sia la via migliore per portarcisi praticamente vicini. Accontentiamoci dunque di esaminare la quistione dal punto di vista della pratica attuale, determinando da quali elementi dipenda il costo effettivo dell'unità di lavoro trasmesso.

Il rendimento elettrico, esprime, come dissi, il rapporto fra l'energia elettrica potenziale che si ottiene nel generatore, e quella che si trasforma nel ricettore, misurate entrambe coi soli dati elettrici.

Il rendimento meccanico o industriale, è naturalmente anch'esso un rapporto, i cui termini rispettivi sono invece il lavoro realmente utilizzabile sull'albero del ricettore, e quello speso dall'altra parte per mantenere in movimento il generatore.

Questo rapporto, non può essere che minore dell'altro; come tutti gli apparecchi trasformatori di energia, anche le macchine elettriche non restituiscono, sotto la nuova forma, che una parte dell'energia somministrata; il rendimento industriale della trasmissione sarà tanto più grande, quanto più elevato l'effetto utile delle macchine impiegate. — Dalle esperienze, per verità assai scarse, se pensiamo all'importanza dell'argomento, risulta che è possibile attualmente trasformare in energia elettrica, circa l'80 % del lavoro speso a far girare l'anello. — I perfezionamenti

Digitized by Google

ulteriori, di cui sono certamente suscettibili questi apparecchi ancora recenti, permettono di sperare che si raggiungano dei valori più elevati, si possa per lo meno avvicinarsi al 90 % o al 92 %, che si disse di aver ottenuto in alcuni casi. — In tutti i modi però, ammesse anche queste condizioni eccezionali, il rendimento industriale di una trasmissione, supponendo che le due macchine lavorino in condizioni egualmente buone, sarà sempre dal 18 al 20 % inferiore a quello elettrico.

Una trasmissione elettrica di lavoro meccanico dunque nelle migliori condizioni teoriche, non raggiungibili certamente dalla pratica, supponendo nulle le perdite nella condotta, trascurandone anzi l'esistenza per modo che si possano ottenere con macchine in condizioni migliori delle Edison dei rendimenti elettrici del 90 %, non potrà effettuarsi con un rendimento meccanico superiore al 70 per cento.

Colla costruzione grafica che ci permise di analizzare le condizioni del massimo lavoro e del rendimento elettrico, possiamo rappresentare anche il rendimento meccanico; esprimere cioè sinteticamente il rendimento effettivo in ciascuna parte del sistema quando si abbia l'avvertenza di misurare tutti i singoli lavori colle medesime unità, per esempio, le unità assolute. — Il lavoro di ciascuna macchina essendo dato da un'area, ciascun centimetro quadrato corrisponderà ad un numero determinato di unità assolute di lavoro. — Aggiungiamo (fig. 24) all'area D E F G del generatore, il rettangoletto D E *d e* di modo che l'area totale *d e* F G rappresenta il lavoro effettivamente speso per ottenere l'energia potenziale elettrica misurata dalla D E F C. Togliamo dall'altra parte, analogamente il ret-

Digitized by Google

tangoletto *g f* G H rappresentante le perdite del ricettore, il rapporto fra le due aree *e a* F C e *g f* H B darà il coefficente meccanico di rendimento. L'area dei due nuovi rettangoletti rappresenta per ciascuna macchina, insieme alla porzione del quadrato H G F C corrispondente al calore che si sviluppa nell'armatura, il costo della trasformazione, in ciascuna di esse potremo rappresentare la parte che dalle esperienze risultasse spettare alle varie cause che assorbono in pura perdita una frazione più o meno grande dell'energia totale[1]. Quali sarebbero, per non citare che le principali, le scintille al collettore, il lavoro continuo di magnetizzazione del nucleo di ferro dell'anello, lo scaldamento delle spire di questo, e in particolare quella della porzione inattiva del filo, l'eccitamento del

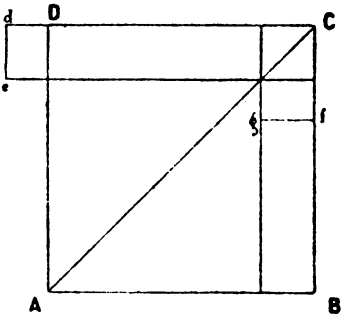

Fig. 24.

[1] Le esperienze a questo proposito si può dire che mancano quasi completamente, e sarebbero non solo del massimo interesse scientifico, ma di grandissima importanza industriale giacchè soltanto in seguito ai risultati sperimentali di questa natura si potranno modificare razionalmente i tipi di macchine esistenti, ed ottenerne insieme un maggior effetto utile, e delle condizioni sempre più favorevoli per la trasmissione di grandi lavori. Un primo passo su questa via fu fatto nelle ultime esperienze di M. Deprez alla Gare du Nord a Parigi — i dati pubblicati finora sono troppo scarsi, e le condizioni degli esperimenti troppo speciali perchè se ne possa cavare qualche conclusione.

Digitized by Google

campo magnetico con una corrente che scalda le spire degli elettromagneti, ecc.

A rendere però ancora più basso il limite massimo de rendimento industriale si aggiunge a tutto questo un'altra causa che influisce direttamente sul rendimento elettrico e della quale non si può ancora ben determinare l'importanza, ma che ad ogni modo, da qualche dato sperimentale isolato, ed anche da alcune considerazioni astratte si può ritenere assai minore di quello che potrebbe parere a primo aspetto e si suppone ancora da molti. — Nessuno ignora di quanta importanza sia l'isolamento sulle linee telegrafiche, e come si debba tener conto, nel calcolare la distanza alla quale il dispaccio può esser trasmesso, del disperdimento lungo i pali di sostegno, che, infissi nel suolo, formano una serie di derivazioni di grandissima resistenza, nelle quali l'intensità della corrente, e quindi il valore assoluto dell'energia dispersa, aumenta necessariamente colla forza elettromotrice, come le fughe attraverso le giunture dei tubi di una condotta d'aqua col crescere della pressione interna. Lungo tutta la linea poi, la superficie del filo telegrafico non ricoperta di sostanze isolanti disperde alla sua volta una parte dell'energia, che può bastare ad interrompere la trasmissione quando, nei tempi nebbiosi, l'aria perde, per effetto dell'umidità, la sua coibenza e questa perdita è come l'altra tanto più grande, quanto maggiore è la forza elettromotrice.

Gli inconvenienti frequentissimi, che si verificano lungo le linee telegrafiche per difetto di isolamento, facevano temere che, trasportando in condizioni analoghe delle somme di energia enormemente più grandi, con forze elettromotrici enormemente più elevate, i disperdimenti avrebbero

Digitized by Google

presto raggiunto tali valori da rendere la trasmissione impossibile.

Certo che ci sarebbe un rimedio efficacissimo, quantunque non assoluto ed assai dispendioso, nel ricoprire i fili conduttori di sostanze isolanti, rimedio che dovrà certamente esser applicato quando si vogliano effettuare delle trasmissioni potenti a distanze considerevoli — ma che può essere superfluo entro limiti abbastanza estesi e di distanza e quantità di lavoro trasmesso quando non siano necessarie, come nell'interno delle città, le linee sotterranee.

Le poche esperienze fatte nello scorso autunno da M. Deprez, tra Wiesbach e Monaco, nelle quali un piccolissimo lavoro (poco più di $^1/_2$ cavallo) era trasmesso alla distanza di 60 chilometri con un filo telegrafico ordinario ed una forza elettromotrice di 2000 Volts, diedero concordemente, in condizioni atmosferiche pessime, una perdita non superiore al 3 % [1].

La stranezza apparente di questi risultati scompare quando si pensi che basta una perdita immensamente minore, perchè la piccola somma di energia, che si richiede per mettere in movimento gli apparecchi telegrafici non sia più

[1] Le esperienze più recenti eseguite dallo stesso Deprez alla Gare du Nord non hanno, sfortunatamente, sotto questo rapporto alcun valore. Il circuito fra le due macchine era costituito di due parti in condizioni essenzialmente diverse. Un filo telegrafico della lunghezza di circa 8 chil. congiungeva due poli, mentre gli altri due erano riuniti da un filo corto, di resistenza trascurabile. L'intensità della corrente era la stessa nelle due macchine, e non si sarebbe potuto tener conto dei disperdimenti lungo la linea che ripetendo le prove colla sostituzione di una resistenza equivalente ben isolata. Ciò che a quanto sembra non s'è potuto fare.

Digitized by Google

sufficiente a raggiungere le condizioni ben definite per le quali lo strumento venne costrutto. — Dei disperdimenti senza dubbio più considerevoli, sottraggono nel nostro caso una frazione dell'energia totale non trascurabile, ma di non grande importanza in confronto a quelle che dipendono dalle altre cause che siamo venute esaminando — e che del resto, si potrà sempre rendere assai piccola quando invece di un filo scoperto si impieghino dei conduttori isolati.

Ad ogni modo, per effetto di questi disperdimenti, l'intensità della corrente nel generatore, sarà maggiore di quella che percorre le spire del ricettore. Il rapporto delle forze elettromotrici darà un coefficente di rendimento elettrico un po' superiore al vero, che si otterrà dal rapporto effettivo dei due lavori misurati elettricamente.

Ed ora che abbiamo raccolti gli elementi necessari, vediamo come si possa risolvere il problema industriale. — Il quale si presenta sotto due forme diverse: o è data l'energia disponibile e si tratta di utilizzarne la frazione più grande possibile, o è necessario ottenere in un punto determinato una certa somma di lavoro, col minor consumo possibile di energia all'origine. In entrambi i casi è sempre fissata invariabilmente la distanza, ed il criterio economico dell'impianto è fornito dal costo finale dell'unità di lavoro trasmesso, che dipende direttamente dal valore del rendimento elettrico della trasmissione.

Le condizioni di questa sono, come sappiamo, tanto migliori quanto più alta la forza elettromotrice in confronto alla resistenza interna del sistema di macchine accoppiate. Ma per una data coppia di valori di questi due elementi (la cui scelta, in corrispondenza al lavoro da trasmettere, dipende dalle macchine che possono essere a disposizione

Digitized by Google

o in generale dal limite massimo raggiunto dai costruttori) il coefficente di rendimento può assumere infiniti valori a seconda della resistenza del filo trasmettitore. Non si potranno ottenere dei rendimenti prossimi al massimo che diminuendo la resistenza, ciò che, quando la distanza è fissata non si può fare che aumentando la sezione. Potremo dunque utilizzare nel primo caso una frazione tanto più grande dell'energia disponibile, nel secondo ottenere il lavoro richiesto con un consumo minore all'origine, ma nell'uno e nell'altra aumentando le spese di impianto nelle quali il costo del conduttore può rappresentare una parte considerevole, e talvolta la massima. — Con quali criteri si dovrà dunque scegliere il coefficente di rendimento più opportuno, perchè tutti gli elementi che concorrono a determinare il costo finale abbiano il minimo valore? — Se il costo dell'unità di lavoro sull'albero del ricettore risulterà di poco differente da quello fornito con altri mezzi, la trasmissione d'energia potrà certamente venir applicata, in buone condizioni economiche, per lo meno in tutti quei casi in cui i vantaggi, che essa può presentare sugli altri sistemi, potranno compensare delle differenze nel valore unitario.

Il costo del lavoro trasmesso è costituito da 3 elementi, ciascuno dei quali dipende dal valore del coefficente di rendimento [1]:

---

[1] L'argomento è trattato matematicamente colla solita chiarezza dal Prof. Galileo Ferraris nella sua bella relazione sull'*Esposizione di Elettricità di Parigi* — insieme a quello della distribuzione di cui ci occuperemo più tardi. — (Roma, Tipog. Botta, dagli *Annali dell'Industria e del Commercio*).

Digitized by Google

1.° Il costo del lavoro motore all'origine: che comprende nel caso di una macchina a vapore la spesa di combustibile, riferita all'unità di tempo e di lavoro (per cavallo e per ora p. e., o per chilogrammetro e minuto secondo) — le spese di sorveglianza e manutenzione della macchina, e nel caso di un motore idraulico l'interesse del canone derivante dall'acquisto dell'aqua, riferito alla stessa unità di tempo;

2.° La quota di interesse e ammortamento del capitale d'impianto, del motore, e delle macchine trasformatrici, riferite, s'intende, alla stessa unità di tempo (ora o secondo) — più quello che dipende dalle spese di manutenzione, riparazione, ecc.;

3.° La quota di interesse e ammortamento, riferita ancora alla stessa unità di tempo, del capitale impiegato nell'acquisto e nella collocazione del filo trasmettitore.

Le prime due parti, che dipendono direttamente dalla somma di lavoro speso, saranno per ciascun cavallo o chilogrammetro trasmesso tanto più piccole, quanto più grande il coefficente di rendimento; la medesima somma spesa si distribuirà su di un numero tanto più grande di unità di lavoro ottenute. — La terza che dipende soltanto dalle dimensioni del filo, sarà invece tanto più piccola quanto maggiore la somma di lavoro trasmesso, e quindi, per qualsiasi coppia di macchine, sarà minima nelle condizioni corrispondenti al rendimento del 50 %.

Il valore più conveniente adunque del coefficente di rendimento elettrico, quello per cui la somma delle 3 parti sarà la minima dovrà essere in ogni caso superiore a 0.50 — giacchè soltanto in queste condizioni l'eccesso sul valore minimo della quota dipendente dal filo può essere compen-

Digitized by Google

sato dalla diminuzione di quelle che derivano dal costo del lavoro motore, e dall'interesse delle spese di impianto per rendimenti elevati.

Di quanto poi questo valore più opportuno del coefficente di rendimento debba superare il 50 % risulterà, per ogni caso particolare, dall'importanza relativa dei vari termini dai quali risulta il costo dell'unità di lavoro trasmessa. Si avrà la massima economia adottando dei rendimenti elevati tenendo pur basso il valore della resistenza tutte le volte che sia grande il lavoro trasmesso in confronto alla distanza che separa le due macchine — e di preferenza si dovranno adottare i valori più alti possibili quanto maggiore il costo del lavoro all'origine. L'influenza del primo termine sarà, p. e., maggiore quando il lavoro sia prodotto con una macchina a vapore che non quando fosse fornito di un motore idraulico. Il valore più conveniente del coefficente di rendimento andrà invece avvicinandosi al 50 % col crescere della distanza fra il generatore ed il ricettore. Per la medesima coppia di macchine e la stessa resistenza esterna, il valore della terza quota cresce proporzionalmente al quadrato della lunghezza del filo di trasmissione, e l'influenza di questo elemento sarà tanto più grande quanto minori l'energia trasmessa, e il costo del lavoro motore all'origine.

Un caso pratico ci permetterà di chiarire ancor meglio questo punto così importante.

Supponiamo di aver disponibile un lavoro effettivo, o, come si dice, la forza di 40 cavalli da trasmettere a 5 chilometri di distanza. — Sceglieremo tra i tipi esistenti di macchine quelle che siano capaci di trasformare questa somma di energia colla massima forza elettromotrice e

Digitized by Google

il minimo di resistenza interna, per esempio una macchina del tipo Brush capace di alimentare 32 lampade ad arco in un solo circuito, che trasforma cioè in corrente elettrica (dell'intensità di 12 ampères), l'energia equivalente a circa 36 cavalli, con 2200 Volts di forza elettromotrice, 23 Ohm di resistenza interna. — Accoppiando due macchine eguali possiamo subito calcolare il massimo lavoro, e il massimo coefficente di rendimento.

Massimo lavoro trasmesso teorico $\frac{E^2}{4R}$ cav. 56,64
Coeff. di rendimento elettrico corrispondente K. 0,50
Energia trasformata nel generatore cav. 113,28

Resistenza del circuito esterno nulla, le macchine sono riunite da un conduttore di resistenza 0. In queste condizioni, quando all'anello del ricettore fosse sostituita una resistenza equivalente, 23 Ohm, e tutta la corrente generata si convertisse in calore, non cambiando il valore della forza elettromotrice, la macchina trasformerebbe l'energia di 226,56 cavalli, di cui una metà si consumerebbe a scaldare inutilmente e dannosamente il circuito mobile; l'intensità della corrente supererebbe i 68 ampères.

Invece di 113 cavalli noi non ne abbiamo disponibili che 40. Manteniamo costante il valore della forza elettromotrice e la resistenza totale, la trasmissione di questa somma minore di energia potrà farsi con un rendimento assai più elevato di quello corrispondente alle condizioni teoriche del massimo lavoro.

Secondo dati forniti dai costruttori una macchina Brush sarebbe capace di trasformare in corrente 0.8965 del lavoro speso. — Il prodotto cioè dell'intensità di corrente gene-

Digitized by Google

rata, per la forza elettromotrice di 2200 Volts, equivalente a cav. 35,86 si ottiene consumando un lavoro di 40 cavalli effettivi. Nelle condizioni del massimo rendimento quando cioè le due macchine siano riunite da un conduttore di resistenza nulla, cav. 9,00 si convertono in calore nel circuito formato dal filo dei due anelli e cav. 26,86 si trasformano nel ricettore. Il massimo rendimento elettrico teorico è dunque 0.749. E supponendo che la spesa della seconda trasformazione nel ricettore sia eguale a quella del generatore, avremo disponibile sull' albero di quello 0.89.65 di 26.86 = cav. 24.08. — Il massimo rendimento industriale corrispondente, senza tener conto delle perdite accidentali, è dunque del 0.60.

Calcoliamo adesso invece la resistenza, e quindi le dimensioni e il costo del conduttore che dovrà effettivamente congiungere le due macchine poste a 5 chilometri di distanza, con diversi valori di coefficente di rendimento elettrico compresi fra 0,749 e 0,50, che sono per noi i limiti estremi fra i quali dovrà trovarsi quello corrispondente alla massima economia.

I risultati sono raccolti nelle tre tabellette, che non abbisognano di spiegazione. La resistenza per chilometri del conduttore esposta nell' ultima colonna della prima tabella fu calcolata ritenendo la trasmissione fatta con filo doppio di andata e ritorno e quindi della lunghezza effettiva di 10 chilometri.

Digitized by Google

LAVORO TRASFORMATO NEL GENERATORE

Cav. 35. 86 pari ad Unità assolute C. G. S. 26100. Forza elettromotrice Volts 2200. Intensità della corrente ampères 12.

Coeffic. di rendimen. elettrico K_e	Lavoro trasformato nel ricettore $eI = K_e EI$		Forza elett.-mot. inversa del ricettore e	Energia conv. in calore nel circuito RI^2		Resistenza totale R	Resistenza del circuito esterno $R-r$	Resistenza per chilom.
	cav.	*C G S*	*Volts*	*cav.*	*C G S*	*Ohms*	*Ohms*	*Ohms*
0.74	26.54	19536	1628	9.32	6864	47.6	1.6	0.16
0.73	26.18	19272	1606	9.63	7128	49.4	3.4	0.31
0.70	25.10	18480	1540	10.76	7920	55.0	9.0	0.9
0.60	21.52	15840	1320	14.34	10560	73.3	27.3	2.73
0.50	17.93	13200	1100	17.93	13200	84.7	33.7	3 87

Se supponiamo che la spesa della seconda trasformazione sia in ogni caso eguale a quella della prima, o in altre parole, che il coefficiente di effetto utile del ricettore sia pure di 0.8965 avremo, in corrispondenza ai valori del coefficiente di rendimento elettrico, i seguenti valori del rendimento meccanico.

Coefficiente di rendimento elettrico	Lavoro meccanico sull'albero del ricettore	Coefficiente di rendimento meccanico
0.74	23.79	0.595
0.73	23.47	0.586
0.70	22.50	0.562
0.60	19.34	0.483
0.50	16.07	0.401

Digitized by Google

In base alla resistenza per chilometro si calcolano facilmente le dimensioni del conduttore coi coefficienti di conduttività che si trovano in tutti i trattati di fisica.

Coefficiente di rendimento elettrico	SEZIONE DEL FILO		DIAMETRO DEL FILO	
	di Rame	di Ferro	di Rame	di Ferro
	mill. □	*mill.* □	*mill.*	*mill.*
0.74	103	618	11.5	28.06
0.73	48	288	7.82	19.22
0.70	18	108	4.79	11.75
0.60	6	36	2.77	6.8
0.50	4	24	2.26	5.6

Ottenute così le dimensioni del filo trasmettitore, sarà facile in ogni caso scegliere tra i vari valori del coefficente di rendimento quello per il quale la somma dei tre elementi perfettamente conosciuti, da cui dipende il costo del lavoro trasmesso, riesca la minima. — S'intende che tutti questi valori di rendimenti e di distanze saranno, in pratica, minori per l'influenza delle perdite accidentali che variano secondo le circostanze, aumentano colla somma d'energia trasmessa, e di cui, per le osservazioni fatte precedentemente, non si può tener conto in via generale, ma che potranno essere determinate sperimentalmente nei singoli casi.

Supponiamo adesso di sostituire alle due macchine Brush, due macchine di resistenza interna tre volte più grande, capaci quindi di trasformare lo stesso lavoro con una forza elettromotrice tre volte maggiore — saranno cambiati i li-

Digitized by Google

miti del massimo lavoro e del massimo rendimento. Il valore di questo, quando siano $E = 6600$ $I = 4$ $r = 138$ diventa *massimo* $Ke = 0.91$ per 40 cavalli.

Un valore ancora più elevato però lo otterremmo se, aumentando la velocità e l'intensità del campo magnetico, si raddoppiasse soltanto la forza elettromotrice senza cambiare la resistenza. In questo caso, sempre per una trasmissione di 40 cavalli

$$E = 4400 \quad I = 6 \quad r = 46 \quad \textit{massimo} \ Ke = 0.93.$$

Adoperando queste macchine più potenti potremo dunque trasmettere la stessa energia coi medesimi rendimenti a distanze immensamente maggiori — sarebbe possibile ottenere sull'albero del ricettore un lavoro effettivo di cavalli 19.34 riunendo le due macchine con un filo telegrafico di ferro del diametro di 4 millimetri e della lunghezza di più di 60 chilometri.

Digitized by Google

V.

ILLUMINAZIONE.

Che dalla medesima corrente si possano contemporaneamente ottenere tutti i fenomeni coi quali si rivelano ai nostri sensi le varie forme dell'energia fisica è noto e non può, dopo quanto abbiam detto sulle leggi e i caratteri di quella, recare meraviglia. Ciascun fenomeno, luminoso, termico, chimico, non è altro che l'espressione diversa della conversione di una determinata somma di energia. Fra i punti del circuito ove s' attacca l' apparecchio trasformatore, si verifica sempre un salto più o meno grande di potenziale dal quale discende, per esprimermi così, una quantità d'elettricità, consumando una parte dell'energia totale della corrente e modificando quindi le condizioni generali del circuito alimentatore.

Però questa analogia strettissima che deriva dall'origine comune, e collega in un solo ordine di idee la serie vastissima delle applicazioni dell'elettricità, viene ad essere nella pratica, dirò così, assottigliata dalle esigenze particolari che determinano, entro limiti ristretti, le condizioni nelle quali i vari fenomeni si devono compiere.

Digitized by Google

Ciascuna applicazione ha già occupato un campo troppo vasto perchè sia il caso di trattarne qui distesamente; pel nostro scopo particolare, piuttosto che i dettagli tecnici, importano delle idee generali che ci permettano di paragonar facilmente tra loro le varie trasformazioni, di porne in evidenza le esigenze diverse e le condizioni comuni, allo scopo di indagare fin dove e con quali mezzi si possano soddisfare, insieme a quelle imposte dalla natura stessa della forma di energia potenziale che le deve alimentare.

Cominciamo, con tale intendimento, ad occuparci di quella che è, attualmente, la più importante, e sarà certamente, anche nell'avvenire, compagna inseparabile alla trasformazione del lavoro meccanico — l'illuminazione.

La produzione della luce per mezzo della corrente s'ottiene in due modi affatto distinti e in diverse condizioni elettriche e luminose mediante due categorie di apparecchi trasformatori: le lampade ad arco voltaico e quelle ad incandescenza, fra le quali si frappongono, come anello di congiungimento, alcuni tipi secondari — detti a semi incandescenza — che partecipano dell'una e dell'altra, ma, sfortunatamente, ne riassumono piuttosto i difetti che le qualità.

Nelle lampade ad arco la trasformazione d'energia avviene nel breve intervallo che separa le punte dei due carboni affacciati e nelle porzioni di questi splendidamente incandescenti, dalle quali proviene quasi tutta la luce abbagliante fornita da queste sorgenti poderose. — Quali fenomeni accompagnano la trasformazione? Quali relazioni collegano l'effetto ottenuto coll'energia potenziale che si spende per mantenerlo?

Quantunque l'illuminazione elettrica sia già tanto diffusa

Digitized by Google

e abbondino i tipi diversi di lampade ad arco, pure, per la natura stessa dei fenomeni che si compiono nella conversione d'energia, siamo lontani dal poterne analizzare le varie particolarità colla stessa sicurezza colla quale abbiamo potuto seguirla durante la trasformazione in lavoro meccanico. La soluzione pratica ha, come in molte altre occasioni, preceduto l'analisi teorica; gli studi, le ricerche presero un indirizzo eminentemente industriale, fecondo di risultati stupendi, lasciando la questione fisica al punto al quale era stata già portata parecchi anni prima dalle esperienze eseguite con apparecchi da gabinetto, con mezzi, con intenzioni diverse di quelle che caratterizzano gli studi fatti recentemente sulle macchine.

Comunque sia, se mancano, e, come vedremo più innanzi, non senza una ragione, delle relazioni numeriche ben definite fra causa ed effetto, le esperienze ora accennate ci permettono di tratteggiare sommariamente il fenomeno nei suoi caratteri generali e delinearne, con una certa approssimazione, le condizioni.

Il circuito esterno del generatore è chiuso in un punto da due asticine cilindriche di carbone, che si toccano colle estremità leggermente appuntate. Ivi la resistenza è tale che una somma abbastanza considerevole d'energia si converte in calore, le punte si arroventano, diventano incandescenti e si consumano, rimanendo separate dal breve intervallo sopraccennato, che è mantenuto costante dall'azione di un apparecchio regolatore. Ma la corrente non cessa; tra le due punte la massa gasosa portata, per il contatto dei due carboni e per il passaggio della corrente, a temperatura elevatissima, ha acquistato la conduttività sufficiente per chiudere il circuito.

Digitized by Google

Lo scatto della scintilla, fra due conduttori affacciati, richiede un salto di potenziale enorme appena la distanza diventi superiore a qualche millimetro; nelle bellissime esperienze eseguite da Warren De la Rue colla sua famosa batteria di più che quindicimila coppie al cloruro d'argento era necessaria, per provocare la scarica tra i due capi del filo posti alla distanza di mill. 8,636, la differenza di potenziale fra i poli di una serie di 8040 elementi o, assai prossimamente, di 8100 Volts. Subito dopo il primo istante, le due punte potevano essere allontanate di un intervallo assai più grande senza che la scarica attraverso l'aria, scaldata dalla prima scintilla, cessasse nè mutasse l'intensità della corrente. Rarefacendo fortemente un gas chiuso in un tubo di vetro, portandolo così, con mezzo diverso, in condizioni analoghe a quelle corrispondenti ad una temperatura elevata, la resistenza diminuisce, e la differenza di potenziale, che si richiede per produrre la scarica, diventa più piccola. Lo stesso salto di potenziale, che alla pressione atmosferica è insufficiente a vincere la resistenza di uno strato d'aria di pochi centimetri di spessore, produce, in un tubo di quasi due metri di lunghezza, una scarica continua, resa evidente dalla luce rossastra che lo riempie.

Nell'intervallo che separa i due elettrodi la corrente percorre dunque un conduttore gasoso, nel quale una ingegnosa esperienza dello stesso De la Rue ha mostrato che la trasmissione avviene secondo la legge di Ohm. In un lungo tubo a gas rarefatto è disposta una serie di 17 anelli d'alluminio attaccati alla parete di vetro da altrettante asticine metalliche leggermente sporgenti da questa. Posti il primo e l'ultimo in comunicazione coi poli dell'enorme batteria,

Digitized by Google

venne misurata la differenza di potenziale fra le coppie consecutive immerse, per così dire, nella corrente che attraversava il conduttore gasoso, e fu trovata sensibilmente costante per le coppie comprese fra il 3° e il 15°, assai superiore invece, e diversa dall'uno all'altro capo, fra gli anelli estremi da una parte e dall'altra.

Ecco, per dare un' idea, una serie di osservazioni fatte dall'illustre fisico inglese:

Anello . .	+ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Diff. di pot.	59	17	13	13	15	15	14	14	12	14	14	14	14	13	13	22	

Come appare da questi numeri, il passaggio della corrente da uno strato all' altro del conduttore aeriforme si effettua colla medesima legge che tra le sezioni consecutive di un conduttore solido, mentre che delle condizioni particolari, diversamente influenti all'elettrodo positivo che al negativo, e di diverso valore complessivo a seconda del grado di rarefazione, accompagnano la trasmissione fra questi ed il gas [1].

Una serie di fenomeni analoghi accompagnano l'arco voltaico, complicandosi con altri che, in questo caso particolare di scarica, acquistano una importanza più o meno considerevole. La differenza di potenziale fra le due punte di carbone che basta, quando queste e il gas interposto sono caldi, a mantenervi un arco di parecchi millimetri di lun-

[1] Un' esposizione dettagliata, dei fenomeni che accompagnano le scariche nei gas, trovasi nel volume XXXII della *Biblioteca Scientifica Internazionale* sotto il titolo: *La luminosità elettrica dei gas*, ecc., di Ferrini e Pogliaghi.

Digitized by Google

ghezza, non sarebbe capace di produrvi una scarica alla temperatura ordinaria; l'arco si sviluppa allontanando leggermente le due punte fra le quali avviene, al momento del distacco, la scarica che innalza la temperatura dell'aria e la rende atta alla trasmissione successiva.

Attacchiamo ora ai serrafili della lampada un piccolo circuito contenente un galvanometro e che, con una disposizione opportuna di commutatore facile a immaginarsi, possa esser chiuso nel momento in cui, interrotta la corrente alimentatrice, l'arco si spegne. L'indice del galvanometro devia repentinamente con molta violenza, il nuovo circuito è percorso da una corrente la cui forza elettromotrice risiede nell'arco, e che, dal confronto delle deviazioni galvanometriche, risulta di direzione opposta a quella fornita dal generatore. Questa esperienza eseguita da Edlund nel 1868, permette di paragonare la lampada a un ricettore elettromagnetico. In entrambi la somma di energia trasformata risulta di due parti: l'una misurata dal prodotto del quadrato dell'intensità della corrente per la resistenza propria dell'arco e dei carboni, l'altra da quello dell'intensità per la forza elettromotrice inversa. Ciascun prodotto rappresenta, in entrambe le trasformazioni, una parte del lavoro totale ottenuto a spese della corrente; la diversità dei fenomeni che le accompagnano dipende appunto dalla prevalenza dell'uno piuttosto che dell'altro dei due elementi e dalle relazioni che, in ciascuna di esse, collegano i fattori da cui risulta il valore effettivo dell'energia trasformata.

Se però le esperienze rivelarono il meccanismo interno della conversione d'energia, siamo ancora assai lontani dall'avere dei dati numerici che ci permettano di separare le

Digitized by Google

due azioni e analizzarne gli effetti — abbiamo una prova dell'esistenza di una forza elettromotrice inversa e di una resistenza dell'arco, ma non si hanno che delle misure incerte dell'effetto complessivo. Le condizioni stesse del fenomeno, che ne rendono già difficile un'analisi superficiale, oppongono degli ostacoli quasi insormontabili a chi voglia eseguire delle misure esatte.

La luce vivissima, abbagliante, di una lampada elettrica è prodotta insieme dall'incandescenza dei carboni, dalla luminosità propria dell'arco, e accidentalmente dalla così detta fiamma che investe una parte più o meno grande dei carboni ed è una delle cagioni dei repentini cambiamenti di intensità luminosa e di colorazione.

Nell'immagine che si proietta sullo schermo (fig. 25) si disegnano le varie parti ora accennate: possiamo seguir passo passo lo sgretolamento delle punte di carbone che, mantenute costantemente alla medesima distanza dall'azione del regolatore, si deformano, si consumano con rapidità e con legge diversa. Mentre l'estremo del carbone superiore (positivo) più largamente incandescente, si arrotonda dapprima, e si va mano mano incavando, l'altra punta s'acumina, si assottiglia, si spinge nell'interno dell'incavo. All'aspetto differente delle due punte corrisponde una diversa temperatura, e quindi una disparità delle condizioni molecolari che determinano, nelle due porzioni incandescenti la trasformazione di tanta parte dell'energia totale. Le bellissime esperienze del prof. Rossetti a questo proposito diedero una media di 3500° pel carbone positivo, 2900° pel negativo. Le condizioni della trasmissione però si modificano continuamente, e l'importanza relativa dei cambiamenti è collegata colla struttura fisica e chimica dei

Digitized by Google

carboni stessi, colle loro dimensioni, coll'intensità della corrente, insieme alle quali varia la temperatura della parte incandescente per la medesima differenza di potenziale fra

Fig. 25.

le due punte affacciate. Tra di esse una macchia azzurro-violacea in forma di botte, a contorni incerti e continuamente mutabili, brilla di una luce debole, tranquilla. È il vero arco voltaico formato dal conduttore gasoso a tem-

Digitized by Google

peratura elevatissima — superiore a quella dei carboni e valutata dal Rossetti a 4800° — la più alta temperatura che ci sia possibile di realizzare artificialmente, tale da fondervi istantaneamente le materie più ribelli all'azione del calore. Un filo di platino si volatilizza di mano in mano che, con movimento abbastanza rapido, lo vado immergendo in questa atmosfera torrida.

Ad intervalli la scena cambia, e una fiamma rossastra o giallognola, dovuta alla combustione di materie gasose che si sviluppano dai carboni medesimi, involge questi e l'arco, che diventa intensamente violetto.

Sulle superficie coniche incandescenti un po' lontano dalle punte, appaiono, specialmente sul negativo, dei piccoli globetti di materia fusa, composti di sostanze diverse a seconda della pasta del carbone, che, assorbiti in certo modo dall'arco, scompariscono, volatilizzandosi, nelle regioni più calde. Con certi carboni questo movimento di globetti liquidi è incessante, e come una pioggia si precipitano dal negativo sul positivo; alcune esperienze antiche e famose provano anzi come tra i due poli avvenga continuamente, durante la scarica, uno scambio di materia, per effetto del quale una parte del polverio strappato a ciascuna punta che si va disgregando, si depone sull'altra.

Tutti questi fenomeni capricciosi, mutabili, sono accompagnati assai spesso da un rumore particolare, chiamato il fischio dell'arco voltaico, e che in generale si manifesta o come causa o come effetto quando l'arco è più instabile, la fiamma mobilissima, la luce oscillante. Il Niaudet, afferma di aver osservato qualche volta che il fischio era accompagnato da un getto di fiamma azzurra, e aggiunge, assai giustamente, che un tal fenomeno po-

Digitized by Google

trebbe benissimo verificarsi sempre e non accusarsi nettamente che in circostanze eccezionali; inoltre accerta che la differenza di potenziale fra le due punte, subisce dei bruschi mutamenti al cominciare o al cessare del fischio, ed il salto è più grande quando l'arco è tranquillo e silenzioso.

Si capisce facilmente, da questo rapido sunto dei mille fenomeni che si verificano nell'arco voltaico, quali e quante debbano essere le difficoltà che si incontrano quando si vogliano tentare delle misure, e come le poche che esistono valgano soltanto entro i limiti e nelle condizioni particolari delle esperienze che servirono a determinarle.

Riassumendo però i pochi risultati sperimentali e le considerazioni teoriche che ne scaturiscono, possiamo dire che: la lunghezza dell'arco cresce col salto di potenziale fra i carboni [1]; la temperatura di questi e sopratutto l'estensione della porzione incandescente, dalla cui grandezza dipende l'intensità luminosa della lampada, aumentano coll'intensità della corrente; il limite minimo del salto di potenziale necessario a produrre l'arco deve bastare a vin-

[1] Ecco alcuni dati sperimentali recentissimi ottenuti dal dottor Fröhlich con apparecchi Siemens:

Lunghezza dell'arco in mill.	*Differenza di potenziale in volts fra i carboni.*
0	39.0
1	40.8
5	48.0
10	57.0
15	66.0
20	75.0

Digitized by Google

cere la cosidetta resistenza al passaggio dal carbone al conduttore aeriforme (o in altre parole a superare la forza elettromotrice contraria), e la resistenza propria di questo; l'intensità della corrente deve esser tale da portare le due punte in quelle condizioni di temperatura e di stato molecolare necessarie a localizzarvi la trasformazione di così gran parte dell'energia.

La quistione non è poi teoricamente più avanzata per quanto riguarda il rendimento luminoso. L'unità fotometrica da un lato non ben stabilita nè praticamente nè teoricamente [1] il confronto delle varie luci dall'altro, reso difficile ed incerto dalla diversa colorazione predominante; gli stromenti che si adoperano nelle determinazioni fondati (meno eccezioni non ancora entrate nella pratica e di cui

---

[1] Le principali unità di luce che si dividono il campo nella pratica sono:

Le lampade Carcel — col becco Carcel in Francia.

La intensità di luce della prima determinata dal peso di olio di colza (42 grammi) consumato all'ora con infinite precauzioni — l'altra dalla quantità di gas di determinata composizione in certe condizioni particolari di becco e di dimensione della fiamma.

In Inghilterra e in America si addottò la candela di spermaceti (da 6 alla libbra inglese) abbruciante 120 grammi all'ora, con una fiamma alta 45 millimetri che si ritiene circa $^1/_{10}$ di carcel.

In Germania un'altra candela di paraffina la cui intensità normale è circa $\frac{1}{7,6}$ della Carcel.

La Commissione Internazionale dell'Esposizione di Elettricità del 1881 delegò una Commissione speciale composta di parecchi fisici illustri per studiare una unità fotometrica comune suggerendo, come assai opportuna teoricamente, la luce emessa da una massa determinata di platino alla temperatura di fusione.

Digitized by Google

non si può fin d'ora giudicare con sufficiente cognizione), sull'apprezzamento individuale [1] aggiungono per proprio conto un tale contingente di incertezze e di errori, per cui si può dire che il rendimento luminoso, il rapporto cioè fra l'energia spesa da una parte e quello ottenuto dall'altra come radiazione luminosa, sia, e pur troppo sarà ancora per un pezzo, un'idea astratta, colla quale i risultati pratici non hanno che una lontana parentela — specialmente quando si tratta della intensità potentissima delle lampade ad arco, alle quali i costruttori attribuiscono, con una larghezza da gran signori, la potenza di migliaia di candele.

Ecco alcuni dati sperimentali che possono dare un'idea sommaria di ciò che praticamente si chiama il rendimento.

Il numero di cavalli dinamici necessari per ogni centinaio di becchi carcel (1000 candele) è approssimativamente nei fari della potenza di

2000	carcel	. . .	cav. 0.4
600	»	. . .	» 0.5
300	»	. . .	» 0.9
100	»	. . .	» 2.0 - 2.4

Nelle lampade differenziali della potenza di 40 carcel ca-

[1] La misura dell'intensità luminosa con tutti i fotometri vien fatta riducendo, con diversi artifici, eguale l'intensità della luce che le due sorgenti da confrontarsi mandano sulla stessa superficie o su superficie opportunamente disposte perchè possano venir esaminate contemporaneamente. È ben raro il caso che due osservatori trovino l'eguaglianza al medesimo punto di adattamenlo del fotometro — e le differenze sono talvolta tutt'altro che insignificanti.

Digitized by Google

valli 2.4 - 2.5. È ancora più grande nelle lampade così dette a semi incandescenza per le quali varia da 3.7 a 6. È massima nelle lampade a incandescenza dell'intensità media di 1 carcel dove si richiedono da cav. 10 a 12 per ogni 1000 candele.

Le condizioni di lavoro di tutti questi apparecchi trasformatori sono necessariamente limitate entro una cerchia assai più ristretta di quelle dei ricettori elettromagnetici. Mentre che in questi ultimi la stessa somma di lavoro può essere ottenuta con valori estremamente diversi di forza elettromotrice e di intensità di corrente, qui la natura stessa della trasformazione pone a poca distanza l'uno dall'altro i limiti estremi del salto di potenziale entro i quali si possono soddisfare le esigenze pratiche dell'illuminazione e specialmente la distribuzione possibilmente uniforme della luce nello spazio da rischiarare coll'impiego di sorgenti di intensità moderata. Mentre che da una parte non si può scendere al disotto di un salto di potenziale di 40 volts fra le due punte, si raggiunge ben presto l'estremo opposto, tanto che le lampade comuni vengono calcolate in base ad una forza elettromotrice media di 50 a 70 volts. Siamo, come si vede, assai lontani dalle condizioni di buon rendimento d'una trasmissione d'energia. Fortunatamente una disposizione ingegnosa dell'apparecchio regolatore conosciuta sotto il nome di lampada differenziale permette di inserire nello stesso circuito una serie di ricettori, ciascuno dei quali utilizza per conto proprio una frazione del salto di potenziale fra i poli del generatore, senza che le variazioni accidentali di intensità di una lampada influiscano sull'andamento regolare delle altre, senza che s'interrompa la corrente alimentatrice se una di esse si spegne.

Digitized by Google

Ne dirò due parole prima di passare alle lampade ad incandescenza.

In tutti i regolatori la distanza fra i due carboni è mantenuta costante dalla stessa corrente alimentatrice. — Nei così detti fari, uno dei carboni è portato da un' asta di ferro che forma il nucleo mobile o è collegata coll'áncora di un elettromagnete le cui spire sono percorse dalla corrente. Il carbone superiore tende per il proprio peso ad avvicinarsi all'inferiore, che assai di frequente è fisso, quando l'intervallo diventa troppo piccolo diminuisce oltre il limite prestabilito la resistenza della colonna gasosa interposta, la corrente diventa più intensa, l'azione sul nucleo o sull'áncora più energica e il movimento s'arresta per ricominciare appena l'arco ha raggiunta la lunghezza normale. Ogni lampada deve essere posta in un circuito separato perchè le variazioni accidentali di una influirebbero sull'andamento di altre simili alimentate dalla stessa corrente.

Nelle lampade differenziali il movimento del carbone superiore è comandato contemporaneamente da due spirali, una percorsa come nel caso antecedente dalla corrente principale, l'altra più sottile, più fitta nella quale scorre una parte di questa; le due azioni si equilibrano, agli aumenti di intensità dell'una corrispondono degli indebolimenti dell'altra, per modo che la velocità di discesa del carbone mobile è proporzionata continuamente al consumo. Le variazioni di resistenza dell'arco sono compensate da quelle della corrente nel 2° circuito la cui intensità cresce appena l'arco oltrepassa la lunghezza normale e riconduce le punte incandescenti alla distanza opportuna. — Allo spegnersi accidentale di una lampada lo stesso apparecchio regolatore chiude un brevissimo circuito attraverso il quale la

Digitized by Google

corrente passa per alimentare gli altri ricettori attivi. Con questa disposizione, mediante una serie abbastanza numerosa di lampade ad arco, si possono utilizzare dei salti considerevoli di potenziale, mentre ciascun apparecchio è percorso da una corrente di intensità moderata. Colle macchine Brush già citate della forza elettromotrice di 2200 volts si possono alimentare 36 lampade ad arco di 400 candele ciascuna disposte sul medesimo circuito della lunghezza di circa 20 chilometri.

Veniamo ora alle lampade della seconda classe, le quali, sebbene indubbiamente inferiori alle prime come trasformatori economici dell'energia, permettono di ottenere l'intensità luminosa richiesta dall'uso domestico e riuniscono insieme tali vantaggi pratici da renderne possibile l'applicazione su vastissima scala. Quantunque le prime lampade di questo genere siano apparse soltanto da un paio d'anni, e comincino solo ora a diffondersi, se ne contano già molti tipi più o meno diversi e fra i quali sarebbe adesso assai difficile giudicare; le differenze però si possono dividere in due categorie, le prime teoriche, e delle quali diremo qualche cosa giacchè si riferiscono alle condizioni di lavoro dell'apparecchio; le altre costruttive, la cui importanza non può essere riconosciuta che da esperienze accurate e dall'uso, ed il cui esame ci porterebbe fuori del nostro campo.

La luce tranquilla delle lampade a incandescenza dipende, come si sa, dalla temperatura elevatissima alla quale è portato, per il passaggio della corrente, un filamento sottile di carbone chiuso in un globetto di vetro, tolto quindi dal contatto dell'aria che lo abbrucerebbe in un istante. Le condizioni elettriche della trasformazione di energia non pos-

Digitized by Google

sono essere più semplici; la corrente percorre il filamento obbedendo alla legge di Ohm; il salto di potenziale fra i capi del filo è sempre eguale al prodotto della resistenza di questo per l'intensità di quella, e l'energia trasformata è misurata completamente dall'uno o dall'altro dei due prodotti EI o RI^2. — Forza elettromotrice (salto di potenziale fra i capi del filo di carbone) per l'intensità, o resistenza del filamento incandescente per il quadrato dell'intensità.

La modificazione introdotta nelle condizioni generali del circuito dalla presenza di una lampada si riduce al cambiamento della resistenza totale, ed i fenomeni luminosi che accompagnano il passaggio della corrente derivano soltanto dalla conversione in calore o più esattamente in energia radiante, di una somma relativamente considerevole di lavoro in una breve porzione di circuito di grande resistenza e di piccola massa. Il calore risultante dalla trasformazione ne eleva la temperatura fino al limite in cui la quantità somministrata equivale a quella perduta per irradiazione termica e luminosa.

Le condizioni di lavoro, o il rendimento luminoso della lampada espresso dal rapporto fra la quantità di luce fornita e l'energia della corrente alimentatrice, sono tanto migliori quanto più alta la temperatura del filamento incandescente. La luce debolissima rossastra verso i 500° diventa vivace verso i 900°, splendida intensissima per temperature più alte, raggiungendo il massimo alla massima temperatura sulle punte dei carboni delle lampade ad arco. Il rapporto fra la radiazione luminosa e la radiazione totale cresce assai rapidamente colla temperatura del solido irradiante. Dalle esperienze di Tyndall fatte nei limiti delle sorgenti luminose comuni risulta che mentre è

Digitized by Google

soltanto $^1/_{25}$ nelle fiamme a gas, (circa 1700°), diventa $^1/_{24}$ per un filo di platino incandescente (1800°), $^1/_{10}$ nei piccoli voltaici, $^1/_5$ e perfino $^1/_4$ colle lampade ad arco più potenti dei fari. — Il filamento incandescente di una lampada elettrica è certamente in migliori condizioni del filo di platino, ma trovasi senza dubbio ad una temperatura di molto inferiore a quella delle punte di carbone di una lampada ad arco perchè si possa supporre che la radiazione luminosa raggiunga soltanto il decimo dell'energia totale che vi si trasforma; ma ad ogni modo sarà tanto più grande il numero delle lampade che si potranno tener accese a pari intensità colla medesima somma d'energia fornita dalla corrente quanto più alta la temperatura del carboncino incandescente. D'altra parte l'energia consumata inutilmente a scaldar i fili che conducono alla lampada la corrente alimentatrice, sarà tanto minore quanto più piccola l'intensità di questa; saranno dunque in generale in buone condizioni di rendimento delle lampade a incandescenza di resistenza elevata, nelle quali la somma d'energia necessaria per portarle alla temperatura opportuna sia ottenuta con una forte differenza di potenziale fra i due capi del filo incandescente e una piccola intensità di corrente.

Certo che quando la trasmissione d'energia dal generatore alla lampada potesse venir fatta immediatamente attraverso dei conduttori di resistenza trascurabile l'influenza della resistenza del filo sul rendimento verrebbe ad avere un valore minimo in confronto all'importanza sempre eguale e sempre grande della temperatura elevata, che può benissimo esser raggiunta anche con resistenze relativamente assai piccole e quindi con deboli forze elettromotrici. Ma nei casi ordinari, e specialmente dal punto di vista di una

Digitized by Google

distribuzione di energia su vasta scala, il valore della forza elettromotrice necessaria per il funzionamento normale della lampada, ha un'influenza considerevole sul prezzo della luce, che risulta non solo da quello dell'energia consumata durante l'esercizio, ma dall'interesse delle spese di impianto fra le quali figura in prima linea quella dei conduttori, le cui dimensioni dipendono dall'intensità della corrente.

Il valore massimo del salto di potenziale fra gli attacchi è limitato dalla resistenza del filamento di carbone dove si compie la trasformazione. Come in tutti i corpi la conduttività elettrica del carbone cambia colla temperatura, e, alla rovescia di quanto accade nei metalli, seguendo la legge comune alle sostanze poco conduttrici, cresce coll'elevarsi di questa. Dalle esperienze risulterebbe che la resistenza a freddo è circa doppia di quella del filamento incandescente, e nel prodotto RI^2 che esprime l'energia trasformata in calore, il valore di R sarà appunto quello corrispondente alla lampada accesa. Siccome poi l'intensità luminosa, a pari temperatura del filo, è tanto più grande quanto più lunga la tratta incandescente, vi è nella pratica un limite abbastanza basso per la lunghezza da darsi al carbone perchè la potenza della lampada non diventi eccessiva, e s'adatti agli usi famigliari ai quali è destinata; la resistenza elevata si dovrà dunque ottenere aumentando più che si possa la resistenza per unità di lunghezza, assottigliando il filo per ottenere delle lampade che permettano di utilizzare un salto abbastanza forte di potenziale con un'intensità luminosa conveniente.

Le difficoltà pratiche risultanti da queste condizioni si capiscono subito; la sottigliezza del filo non può essere

Digitized by Google

spinta oltre un certo limite senza comprometterne la sicurezza, tanto per effetto di urti meccanici come per quello più pericoloso di un leggero eccesso di corrente. Le lampade di grandissima resistenza sono necessariamente, coi mezzi attuali di fabbricazione, fragili, delicate e quindi poco industriali [1].

La sottigliezza raggiunta dall'Edison nei suoi filamenti di bambò tocca già davvicino il limite pratico di buone condizioni commerciali, pure il massimo salto di potenziale tra gli attacchi di una lampada dell'intensità di 16 a 20 candele raggiunge appena i 110 volts; nelle Swan di resistenza assai più bassa, si riduce a 45 o 50 ed è ancor minore per le Maxim, e le Lane-fox, le quali sopportano con maggior indifferenza dei cambiamenti di intensità nella corrente alimentatrice che non le prime, e possono, per questa ragione, in alcuni casi essere preferite.

---

[1] In una serie di esperienze eseguite nell'estate scorso insieme al mio amico ing. P. Guzzi, riuscimmo a fabbricar delle lampade della resistenza di più che 700 ohms a freddo, e una lunghezza di filo di circa sette centimetri. L'intensità luminosa di una carcel si otteneva con una corrente debolissima e un salto di potenziale di circa 250 volts. Tutte queste lampade si ruppero per effetto di variazioni imprevedibili della velocità del generatore; appena la forza elettromotrice superava di poco il valore normale il filamento che resisteva senza rompersi agli urti meccanici o si spezzava o cascava, quando il salto era forte, in polvere minuta. Lo stesso Edison che avea tentato una lampada di 200 ohms di resistenza e 10 candele o 1 carcel di intensità, pare vi abbia per ora rinunciato, preoccupato della breve durata; dai pochi numeri che abbiam potuto raccogliere nelle nostre esperienze a parità delle altre condizioni, parrebbe che le lampade di grande resistenza diano dei rendimenti superiori alle altre.

Digitized by Google

Se qualche nuova scoperta inaspettata non fornisce dei mezzi, attualmente non prevedibili, per portare la resistenza delle lampade a valori assai più elevati senza comprometterne la sicurezza, non parrebbe possibile oltrepassare di molto i valori massimi attuali di rendimento, giacchè non si saprebbe, tra i corpi conduttori conosciuti, trovarne un altro che riunisca in grado così eminente come il carbone le condizioni opportune — la rifrattarietà somma, il massimo potere irradiante ed una facilità grandissima ad essere foggiata in filamenti sottili e resistenti di minimo prezzo.

La natura stessa di questi apparecchi, le esigenze del servizio cui sono destinati, escludono addirittura la possibilità di utilizzare dei grandi salti di potenziale con disposizioni analoghe a quelle adottate colle lampade ad arco. L'applicazione dei commutatori, per mezzo dei quali la corrente, tolta da una lampada spenta, passi ancora per le altre inserite nel medesimo circuito, se è possibile per un numero limitato di ricettori è assolutamente impraticabile quando questi siano, come è il caso più comune delle lampade a incandescenza, assai numerosi — oltrechè non si saprebbe come ovviare, con mezzi pratici, agli inconvenienti gravissimi che potrebbero nascere quando, per un accidente pur troppo assai frequente, rompendosi il carbone di una lampada la corrente fosse interrotta, e tutte le altre della serie si spegnessero istantaneamente, senza che sia possibile rimediarvi prontamente. Inoltre quando le lampade fossero tutte poste sul medesimo circuito, sarebbe tolta la possibilità di variarne indipendentemente l'intensità luminosa cambiando quella della corrente alimentatrice. Condizioni che sono, la prima specialmente, di una importanza

Digitized by Google

così decisiva per apparecchi destinati all'uso domestico, che in tutti gli impianti d'illuminazione con lampade ad incandescenza, da quelli colossali di Edison, ai piccoli impianti parziali di poche fiamme, gli apparecchi si dispongono in altrettanti circuiti derivati od almeno aggruppati, quando la forza elettromotrice del generatore è eccessiva, in piccole serie, i cui componenti per le condizioni particolari dell'impianto possono anche non essere indipendenti.

Un'altra considerazione importante nei casi pratici, specialmente per l'imperfezione dei sistemi adoperati, e che decise i costruttori ad adottare la disposizione suaccennata è la possibilità di mantenere costante in ciascun apparecchio l'intensità della corrente, ciò che, come vedremo più innanzi parlando della distribuzione dell'energia, si ottiene in questo caso con un' approssimazione sufficiente senza ricorrere alle disposizioni particolari suggerite dalla teoria e che raggiungono l'effetto in modo assoluto e generale.

La costanza della corrente alimentatrice non ha soltanto per iscopo di mantener fissa la luce, la cui intensità seguirebbe, esagerandole, le variazioni di temperatura prodotte da quelle della corrente, ma è necessaria per la durata delle lampade stesse, e di tanto maggior valore quanto più alta la resistenza, più sottile il filamento incandescente. Lo squilibrio molecolare risultante dall'azione complessa della corrente e dall'altissima temperatura fa sì che, dopo un periodo più o meno lungo, il filo, senza cagioni apparenti, si spezzi e talvolta si polverizzi. La durata di una lampada, o il numero di ore che essa può rimanere accesa, dipende, oltre che dalle qualità del filamento, dall'intensità della luce che gli si fa produrre — si potrebbe dire, per fissare le idee

Digitized by Google

che, a parità delle altre condizioni, ogni lampada è capace di fornire una somma determinata di energia luminosa la quale si esaurisce tanto più rapidamente quanto più grande l'intensità della luce prodotta; la vita della lampada è quindi tanto più breve quanto più alta la temperatura e migliore il rendimento. Una lampada mantenuta costantemente ad un'intensità moderata dura dippiù, ma fornisce la luce con un maggior consumo di energia.

Si capisce da ciò come possano essere pericolosi dei salti bruschi di intensità al disopra del valore normale — pochi secondi possono bastare a rendere la lampada assolutamente inservibile rompendone il filo, e anche soltanto magari tappezzando l'interno del globetto di vetro di uno smalto iridescente che proviene dalla volatizzazione parziale degli attacchi metallici [1].

Le lampade ad incandescenza sono, per la loro stessa natura, apparecchi delicati che fortunatamente non esigono da chi li adopera nessuna cura, nessuna sorveglianza, ma che, viceversa, richiedono assolutamente una grande costanza nelle condizioni della corrente alimentatrice e, per gli usi domestici ai quali sono destinate, un'assoluta in-

[1] La rottura del filamento quando avviene per eccesso istantaneo di corrente è accompagnata da fenomeni curiosi. Accadde spesso di osservare, nelle sperienze già citate, un vero arco voltaico fra gli attacchi metallici, o fra gli estremi del filamento spezzato. — La lampada in quest'ultimo caso rimane accesa, quantunque con intensità alquanto minore, per un tempo abbastanza lungo. — Quando il filamento si polverizza, i frammenti minutissimi lanciati contro le pareti vi disegnano delle strisce più o meno fitte e che corrispondono alle linee di forza del campo del filo.

Digitized by Google

dipendenza le une dalle altre. La loro introduzione in un sistema complesso di trasmissione d'energia è quindi subordinata a delle condizioni assai più rigorose che non le lampade ad arco, in proporzione alle esigenze maggiori che dipendono direttamente dall'uso più intimo e dalla suddivisione fra un numero assai più grande di utenti.

Digitized by Google

VI.

PROCESSI ELETTROLITICI. ACCUMULATORI.

Gli effetti chimici che accompagnano il passaggio della corrente in un liquido composto, si possono dividere in due grandi categorie riguardo all'energia che richiedono per essere prodotti ed all'indole delle applicazioni industriali che ne derivano. La prima, che abbraccia la serie svariata dei processi galvanoplastici, nella quale l'effetto ottenuto è proporzionale all'intensità della corrente, ma richiede una somma d'energia variabile a seconda delle condizioni particolari del fenomeno, l'altra che comprende i processi metallurgici e gli accumulatori nella quale l'energia elettrica riappare in una somma equivalente di lavoro chimico e può venir restituita dalla ricombinazione degli elementi separati.

Oltre all'importanza industriale acquistata da alcune applicazioni elettrochimiche, tale da fare di queste uno dei rami più fiorenti dell'elettrologia, la trasformazione chimica dell'energia elettrica ha per noi un'attrattiva speciale per la quistione degli accumulatori, intorno ai quali s'è creato da qualche tempo un interesse assai vivo scienti-

Digitized by Google

fico e commerciale, e che meritano, per molte ragioni, un esame accurato.

Vediamo di farci, prima di tutto, un' idea generale del fenomeno. In un vaso pieno di solfato di rame stanno immerse due lamine di rame affacciate a breve distanza, ciascuna delle quali s'attacca ad uno dei conduttori che partono dai poli del generatore; il circuito è chiuso dal liquido interposto. Il passaggio della corrente non è apparentemente accompagnato da alcun fenomeno che ci possa far sospettare nel liquido qualche cosa di diverso della conduttività definita dalla legge di Ohm. Il liquido si scalda, ma troppo lentamente perchè durante una breve esperienza se ne possa constatare il cambiamento di temperatura, che fu però misurato accuratamente da Joule e da Becquerel, e può esser reso evidente aumentando l'intensità della corrente che lo attraversa. — Le due lamine di rame sono sospese agli estremi di un giogo di bilancia che, al principio dell'esperienza, era perfettamente equilibrato; pochi momenti dopo la chiusura del circuito, l'indice comincia a deviare. Le due lamine cambiarono dunque di peso e precisamente di tanto crebbe il peso dell'una di quanto diminuì quello dell'altra. Il rame di quest'ultima si discioglie per effetto della corrente, mentre che un peso eguale si deposita sulla prima, e questo trasporto continua finchè dura la corrente, si compie con maggiore rapidità quanto più questa è intensa, senza che il liquido subisca altre alterazioni fuorchè quelle derivanti da cause accidentali.

Al solfato di rame sostituisco dell'acqua leggermente acidulata; al chiudere del circuito una moltitudine di bollicine gasose sale, lungo le lamine, attraverso il liquido e riempie le due campanelle soprastanti rispettivamente di

Digitized by Google

ossigeno e di idrogeno nelle proporzioni volute per ricostituire, combinandosi, l'acqua che venne scomposta. Sostituisco adesso due lamine di zinco alle due di rame immerse nel vitriolo azzurro, in poco tempo il liquido si scolora, e la lamina negativa, intorno alla quale nell'esperienza coll'acqua salivano le bollicine di idrogeno, si copre di uno straterello di rame derivante dalla scomposizione del solfato.

La corrente attraversando un liquido composto ne separa dunque gli elementi o i gruppi di elementi in due parti, ciascuna delle quali si raccoglie su una delle lamine comunicanti coi poli dell'elettromotore.

Faraday, che determinò le leggi del fenomeno, chiamò elettrodi le due lamine immerse e rispettivamente anodo la lamina positiva, catodo la negativa, elettrolito la sostanza scomposta, elettrolisi la decomposizione.

La separazione degli elementi di un composto qualsiasi, richiede una somma di energia pari a quella che viene sviluppata dalla loro combinazione, e che, nell'elettrolisi, deve esser fornita dalla corrente, e non può servire, nel circuito, a produrre alcun altro effetto nè di scaldamento nè elettromagnetico. — Come varia la quantità di calore sviluppata nelle combinazioni dei vari corpi, così è diverso il lavoro equivalente che bisogna spendere per separarli, e che sarà naturalmente tanto più grande quanto più stabile il composto.

Ora dalle famose esperienze di Faraday risultò: 1° che la quantità di ogni elettrolito scomposto da una corrente è proporzionale alla quantità di elettricità che lo attraversa, o in altre parole alla intensità ed alla durata della corrente: 2° che i pesi dei diversi elettroliti decomposti da

Digitized by Google

una corrente costante, sono proporzionali ai rispettivi pesi di combinazione. — Ora, siccome il lavoro della corrente nell'operare la decomposizione, è uguale a quello che i pesi degli elementi raccolti sugli elettrodi restituirebbero ricombinandosi, il peso di ciascun elettrolito scomposto dall'unità di corrente in un secondo è, come quelli, una quantità perfettamente definita e costante, che venne, per analogia, chiamata l'equivalente elettrochimico della sostanza.

Cerchiamo ora di comprendere il meccanismo interno del fenomeno:

Perchè una quantità determinata di elettricità passi dalla lamina immersa al liquido, è necessario tra di essi un salto di potenziale, come fra due sezioni consecutive di un conduttore qualsiasi. Se il liquido è, come il mercurio, un corpo semplice, la corrente passa obbedendo alla legge di Ohm, e a seconda della resistenza si converte in calore una somma d'energia corrispondente. Quando il liquido è composto, il fenomeno si complica. Per effetto del salto di potenziale fra la lamina metallica e lo strato liquido a contatto, passa dall'uno all'altro una quantità determinata di elettricità, la quale compie nel tragitto il lavoro rappresentato dal loro prodotto. Se tutto questo lavoro venisse impiegato a scomporre l'elettrolito, gli elementi risultanti riescirebbero dotati di una somma di energia potenziale equivalente, che può venir restituita dalla loro combinazione. Perchè dunque la quantità unitaria di elettricità possa raccogliere in un secondo sull'anodo il peso corrispondente all'equivalente elettrochimico dell'elemento elettronegativo che risulta della scomposizione dell'elettrolito, è necessario che il lavoro espresso dal prodotto di queste unità per il salto di potenziale, sia eguale a quello che

Digitized by Google

l'egual peso di questo elemento può restituire ricombinandosi colla quantità determinata dell'altro che si raccoglie al catodo. Questa somma di lavoro, essendo perfettamente determinata per la coincidenza dei pesi di combinazione chimica cogli equivalenti elettrochimici, è necessario, per ciascun corpo, un determinato salto di potenziale affinchè la corrente possa effettuarne la scomposizione. Una forza elettromotrice più grande, mantenuta fra gli elettrodi, farà procedere più rapidamente l'elettrolisi provocando una corrente più intensa, ma una parte dell'energia verrà consumata altrimenti che nel lavoro di decomposizione [1] mentre che d'altra parte per valori delle forze elettromotrici inferiori al limite fissato, la corrente è incapace di separare gli elementi e una quantità comunque grande di elettricità attraverserà il liquido, senza che vi si compiano delle azioni chimiche soggette alle leggi elettroliche di Faraday. Anche in questa trasformazione l'energia somministrata dalla corrente compie contemporaneamente due lavori, l'elettrolitico ora considerato, e quello di scaldamento dipendente dalla resistenza propria del liquido. Anche qui il lavoro totale è sempre misurato dalla somma dei due termini relativi e, come nella trasformazione elettromagnetica, quello corrispondente all'effetto termico rappresenta una delle perdite inseparabili della conversione d'energia.

Torniamo adesso alle nostre lamine di rame. — A contatto dell'anodo adunque il solfato di rame si scompone, in quantità diversa secondo l'intensità della corrente; cia-

[1] È ciò che realmente accade, giacchè una parte dell'energia elettrica si trasforma sempre in calore per la resistenza propria dell'elettrolito.

Digitized by Google

scuna molecola che si scinde assorbe una somma determinata di energia, la quale viene ad essere immagazzinata da ciascun elemento nelle proporzioni volute dai pesi di combinazione. — L'acido solforico si raccoglie coll'ossigeno libero sulla lastra di rame dell'anodo; l'energia potenziale immagazzinata si restituisce immediatamente colla formazione di una nuova molecola di solfato di rame a spese della lamina che diminuisce di peso, mentre che il rame libero, o come si dice, nascente viene a depositarsi sulla lamina opposta (il cui peso aumenta) per un processo ignoto di combinazioni e scombinazioni successive, nelle quali il consumo di energia delle prime è sempre compensato da quella restituita dalle seconde.

Che la trasmissione non avvenga per il trasporto diretto dell'elemento libero, ma in seguito ad un processo interno lo si verifica facilmente obbligandolo a passare attraverso sostanze per le quali abbia una grandissima affinità senza che si combini con esse.

Tre piccoli vasi contengono, il primo una soluzione di solfato di soda, il secondo del siroppo di viole, il terzo dell'aqua pura. La corrente passa successivamente dall'uno all'altro per mezzo di archetti conduttori fatti di cotone imbevuto di liquido; il solfato nel primo vaso si scompone e sul catodo si raccoglie della soda, mentre si trova dell'acido solforico nell'ultimo reso evidente dall'arrossarsi della listerella di carta immersavi. — Il colore della soluzione del vaso intermedio non ha cambiato, eppure basta gettarvi una quantità minima di acido solforico libero perchè si muti in un rosso distintissimo.

L'energia spesa per scomporre in fin dei conti una molecola di solfato di rame, e deporre quindi sulla lamina

Digitized by Google

del catodo la quantità di metallo che essa contiene, viene continuamente restituita dalla ricombinazione che si compie durante il passaggio della corrente; la deposizione di uno strato di rame sul catodo si effettua senza spendere altro lavoro che quello necessario a vincere le resistenze passive rappresentate dalla resistenza totale del circuito e dalle perdite dipendenti dalle mille irregolarità accidentali che disturbano l'andamento teorico.

La quantità di rame deposto sul catodo dovrebbe essere perfettamente eguale a quella che va mano mano perdendo l'anodo, il liquido interposto che assorbe, indipendentemente dall'elettrolisi, una somma di energia a cagione della propria resistenza e si scalda, dovrebbe mantenersi inalterato quando fosse assolutamente puro, e nessuna perturbazione intralciasse l'andamento dell'operazione.

Il consumo di energia avviene nelle stesse condizioni, del lavoro di una locomotiva che trascina un convoglio su di una strada orizzontale. — Una somma di energia vien spesa dal momento in cui comincia il movimento fino a quando s'è raggiunta la velocità di regime, da questo punto in avanti il lavoro della macchina è impiegato a vincere le resistenze passive che dipendono necessariamente dalla massa posta in movimento; l'energia communicata nel primo periodo, viene restituita durante il rallentamento che precede l'arresto alla stazione successiva, nel qual tempo la macchina è spinta sulle rotaie a spese del lavoro immagazzinato nella massa viaggiante del treno.

E che le cose avvengan precisamente a questo modo lo provano le belle esperienze di Gramme, eseguite alcuni anni or sono, quando si trattava di sostituire colle prime macchine dinamo-elettriche le pile adoperate nella galva-

Digitized by Google

noplastica. — Il peso di rame deposto per chilogrammetro di lavoro complessivamente speso ha variato da 1. 58 a 23. 18, e diffalcando nelle varie esperienze le perdite di lavoro del motore, e quello assorbito per elevazioni di temperatura da 2. 16 a 140 — si può dunque dire che la quantità di rame trasportato dall'uno all'altro elettrodo è indipendente dal lavoro effettivamente consumato, pur mantenendosi sempre, in ogni fase dell'esperienza, proporzionale alla quantità di elettricità che attraversa l'elettrolito in ogni unità di tempo.

Le cose vanno ben diversamente quando, come abbiamo visto nelle due ultime esperienze, il lavoro di ricomposizione non eguaglia quello speso per separare gli elementi dall'elettrolito. L'energia della corrente ha operato la separazione; i due elementi sono dotati adesso di una somma d'energia potenziale equivalente a quella consumata, che non possedevano prima, e possono restituire ricombinandosi. Per riprendere il paragone di prima, il treno percorre adesso il suo cammino in salita; il lavoro continuo della macchina deve bastare non solo a vincere, come prima, le resistenze passive, ed a muovere il treno al primo momento, ma a sollevarlo continuamente vincendone il peso, e communicandogli dell'energia potenziale, che il treno può restituire discendendo.

Mentre prima non si faceva che togliere il rame [1] da

[1] S'intende da sè che quello che si dice pel rame vale per qualsiasi metallo, purchè le lamine siano immerse in un bagno formato di un sale solubile dello stesso metallo. — Tutti i metalli formano l'elemento elettro-positivo relativamente agli acidi e all'ossigeno che costituiscono insieme ad essi il sale disciolto e si raccolgono al polo opposto.

Digitized by Google

una parte per portarlo dall'altra e la serie delle scomposizioni successive determinate dalla corrente non era che il mezzo per raggiungere lo scopo, ora si ottiene il metallo separandolo dalle sostanze colle quali era combinato, e nessuna ricomposizione dei medesimi elementi restituisce il lavoro speso.

È un vero processo metallurgico, paragonabile a quelli, che, modificati a poco a poco dall'applicazione di metodi scientifici, forniscono, da tempo immemorabile, l'enorme quantità di metallo, che viene continuamente adoperato dall'industria. — Il lavoro necessario per separare il metallo dagli elementi diversi coi quali trovasi combinato è fornito dalla combustione. L'energia potenziale accumulata lentamente dallo svolgimento della vita organica, si trasforma, si restituisce, ed all'altissima temperatura degli alti forni, i minerali ridotti a composti fusibili da una serie complessa di operazioni preliminari, abbandonano il metallo, liquefacendosi. — Nei processi elettro-chimici, come in quello che si comincia ad applicare per l'estrazione dello zinco, all'energia termica si sostituisce l'energia elettrica, per mezzo della quale il minerale viene scomposto dopo essere stato, con un diverso processo di operazioni preliminari, ridotto a tale condizione che, disciolto nell'acqua, possa essere sottoposto all'elettrolisi. La corrente, fornita dai generatori, si ottiene dall'energia delle cadute d'aqua che si trovano sempre, nei paesi montuosi, in vicinanza alle miniere, i prodotti commerciali si estraggono dal minerale senza essere obbligati, come accade assai spesso, a trasporti costosi di un materiale inutile o d'un combustibile lontano.

Su di una scala più vasta si applica industrialmente l'e-

Digitized by Google

lettrolisi, alla purificazione dei prodotti greggi delle miniere. — Nella Deutsche Affinerie di Amburgo, nello stabilimento metallurgico d'Oker, centinaia di tonnellate di rame vengono disciolte nei bagni elettrolitici e raccolte sull'anodo allo stato di purezza quasi assoluta, separandone insieme e le numerose impurità ed i metalli preziosi, che vi sono quasi sempre mescolati e si raccolgono sul fondo delle vasche di appuramento. Nel solo stabilimento di Oker, per dare un'idea dell'importanza della cosa, la rettificazione di 500,000 chilogrammi di rame, estratto dal minerale coi processi comuni, produsse più di 700 chilogrammi d'un miscuglio d'oro e d'argento (quest'ultimo in proporzione molto maggiore del primo) ed una quantità assai più rilevante di antimonio, arsenico, cobalto, bismuto, ecc.

Il rendimento metallico di un ricettore elettrochimico è una quantità che può variare nei bagni di galvanoplastica, e in quelli di appuramento entro limiti estesissimi; ed in generale si può dire che sarà tanto più elevata quanto più la forza elettromotrice sarà vicina al limite richiesto dalla qualità dell'elettrolito, minore la resistenza interna, e più grande la purezza della soluzione.

A questo proposito è assai istruttiva una delle esperienze già citate di Gramme. Mantenendo costante la velocità della macchina, la forza elettromotrice e l'intensità della corrente, inserì l'uno dopo l'altro nello stesso circuito un numero sempre crescente di bagni galvanoplastici ad anodo solubile. Aumentando, insieme al numero dei bagni la superficie delle lamine di rame diminuendo cioè proporzionatamente la resistenza di ciascuno, la resistenza totale del circuito rimaneva sensibilmente costante e con essa il lavoro speso nel generatore. — La quantità di rame deposto

Digitized by Google

in ciascun bagno, come risulta dalla tabella, rimase sensibilmente la stessa quantunque il numero di questi abbia variato da 3 a 11. — I grammi di rame ottenuto per ogni chilogrammetro-ora di lavoro, aumentarono, nel rapporto di 1 a 3,8, mentre che nello stesso rapporto (1 a 3,6) è diminuito il salto di potenziale per ciascuna coppia di elettrodi. Il deposito costante di circa 5 grammi all'ora per ciascun bagno s'ottenne in ognuna di essi con un lavoro circa 4 volte minore tra la prima e l'ultima esperienza. Il prodotto EI rappresenta in ogni caso il lavoro speso a superare le resistenze passive.

Numero dei bagni	Deviazione d. galvanom. I.	Lavoro totale in Kgm. $\frac{E\ I}{9.81}$	DEPOSITO DI RAME IN GRAMMI		
			Totale in un'ora	Per bagno	Per Kgm. di lavoro totale
3	7.°5	3.397	15.75	5.25	4.63
5	7.5	3.452	29.00	5.80	8.43
7	7.5	3.520	37.38	5.34	10.62
9	7.5	3.279	48.00	5.33	14.63
11	7.5	3.449	61.60	5.60	17.85

Entro limiti assai più ristretti, per le relazioni diverse che lo collega coll'energia potenziale della corrente, varia il rendimento dei bagni elettrolitici della seconda categoria nei quali la quantità di metallo dipende dal lavoro somministrato.

Anche qui, e in proporzione maggiore che nel primo caso, intervengono a modificare le condizioni di lavoro delle azioni chimiche secondarie, provocate dalla corrente, che variano a seconda delle condizioni di questa, e complicano

Digitized by Google

talmente il fenomeno elettrolitico da renderne nella maggior parte dei casi incerta l'interpretazione. Dell'influenza di queste azioni secondarie sulle condizioni di rendimento non si può, nello stato attuale delle cognizioni scientifiche tener conto in via generale. I calcoli teorici fondati sulla base della grande legge elettrolitica di Faraday devono essere modificati nei singoli casi pratici coll'aggiunta di coefficienti, che riassumano sperimentalmente, per quel caso particolare, l'insieme dei fenomeni ignoti che accompagnano, e di solito disturbano, l'effetto chimico principale.

Le condizioni però più opportune della corrente alimentatrice risultano evidenti. — Intensità di corrente proporzionata all'effetto che si vuol ottenere; salto di potenziale fra gli elettrodi il più vicino possibile a quello richiesto per la scomposizione dell'elettrolito interposto, e quindi assai basso [1] riducendo in ogni caso al minimo la resistenza interna. Le condizioni di lavoro di ciascun ricettore sono, in certo modo, opposte a quelle dei ricettori elettromagnetici pei quali i migliori rendimenti si verificano appunto quando è piccola l'intensità della corrente grandissima la forza elettromotrice.

Un salto di potenziale considerevole può però venire utilizzato con profitto disponendo uno dopo l'altro o, come si dice, in serie sullo stesso circuito un numero abbastanza grande di ricettori. Ciascuno di essi trasforma una parte dell'energia totale, in condizioni tanto più vicine a quelle del massimo rendimento, quanto più il piccolo salto di po-

[1] Il salto di potenziale necessario alla scomposizione del solfato di rame è secondo i calcoli di Thompson Volts 2.40, — per il solfato di zinco Volts 1.28.

Digitized by Google

tenziale fra gli elettrodi risponde alle esigenze particolari dell'elettrolito che chiude fra di essi il circuito. — Si potrebbe dire che ad ogni ricettore elettro-magnetico sia paragonabile una serie di ricettori elettrochimici, abbastanza numerosa perchè il salto disponibile venga utilizzato completamente [1].

Ed ora veniamo ad un'altra applicazione elettro-chimica, che si collega in modo speciale alla questione del trasporto e della distribuzione dell'energia, gli accumulatori i quali sono attualmente l'oggetto di studi scientifici spinti ma talvolta fuorviati da una *réclame* commerciale impaziente e come sempre intemperante.

Due lamine di piombo formano gli elettrodi di un bagno elettrolitico contenente dell'acido solforico diluito con un peso d'aqua dieci volte maggiore del proprio; al passaggio della corrente, la lamina collegata col conduttore positivo si ricopre d'ossigeno, il quale attaccando vivacemente la superficie metallica la riveste di uno strato nerastro risultante dalla loro combinazione, mentre che sull'altra si

[1] S'intende che qui si tratta soltanto di condizioni generali, che riguardano l'introduzione dei ricettori in un sistema di trasmissione piuttosto che di quelle, variabili, determinate nei singoli casi dalla natura, dal valore dei prodotti industriali che si vogliono ritrarre dall'elettrolito. I depositi metallici nei bagni galvanoplastici si formano del resto tanto più regolarmente quanto più lenta l'azione chimica. Quelli prodotti con correnti troppo intense riescono granulosi, incoerenti, pieni, quando l'intensità oltrepassa un certo limite di arborescenze complicatissime che deformano completamente l'oggetto ricoperto. — La disposizione dei bagni in serie numerose, alimentati da deboli correnti è quindi buona in generale anche dal punto di vista delle qualità dei prodotti commerciali.

Digitized by Google

raccoglie una moltitudine di minutissime bollicine d'idrogeno che, quando la corrente è intensa, si sviluppano assai rapidamente e si vedono salire attraverso il liquido. — Interrotto il circuito principale, riunisco i due elettrodi con un nuovo circuito che contiene ancora il galvanometro, e di cui fa parte un filo sottile di platino. Immediatamente questo s'arroventa, l'ago dell'istrumento devia indicando una corrente diretta in senso opposto alla prima e che, assai intensa nei primi istanti, in breve tempo si esaurisce. A spese dunque dell'energia della corrente il liquido interposto fra gli elettrodi si decompone: all'azione elettrolitica si aggiungono delle azioni chimiche laterali che, insieme ad essa, determinano la formazione della massa di materia nerastra di cui si copre l'anodo, la quale scomponendosi durante la scarica restituisce come corrente una frazione del lavoro accumulato dal processo chimico.

Una serie analoga di fenomeni chimici complessi, di oscure trasformazioni che si intravvedono senza che se ne possa seguire lo sviluppo accompagna, si può dir sempre, l'elettrolisi, ed è nota nel suo insieme col nome generico di polarizzazione. A seconda della natura del bagno e degli elettrodi varia l'importanza del fenomeno generale, e quella relativa dei fenomeni concomitanti, e con essi la intensità, e la durata della corrente che si ottiene chiudendo il circuito, la quale, fin dalle prime esperienze antiche quanto l'invenzione della pila, venne chiamata secondaria o di polarizzazione per distinguerla da quella che l'ha provocata.

La quantità di energia elettrica accumulata chimicamente; quella che può essere restituita di poi nella corrente secondaria; la costanza e la durata di questa, oltre che dalla

Digitized by Google

natura chimica delle sostanze reagenti, dipendono dalla struttura fisica degli elettrodi.

Se fra le due lamine facciamo succedere l'una all'altra ad intervalli diversi, cambiandone il senso e la durata, una serie di correnti che diremo attive o di carica e di correnti secondarie o di scarica, a poco a poco la struttura superficiale si modifica in modo permanente. La materia nerastra che ricopre il polo positivo, vi forma uno strato dello spessore di $^1/_4$ a $^1/_2$ millimetro, mentre che il metallo dell'altra lamina assume un aspetto minutamente granuloso che pure si propaga all'interno. Le correnti di scarica si esauriscono molto meno rapidamente, e, quando la formazione, come vien chiamata, delle due lamine è abbastanza avanzata, l'apparecchio può venir adoperato come un vero generatore di corrente, durante un periodo, che in condizioni opportune, può essere abbastanza lungo, nel quale il lavoro chimico che si compie a circuito chiuso restituisce una parte dell'energia che venne immagazzinata durante il passaggio della corrente eccitatrice.

L'idea di utilizzare industrialmente questo insieme di proprietà singolari non è così recente come si potrebbe credere. Fino dal 1859 G. Planté, al quale si devono gli studi più importanti sulla questione, nel presentare i risultati delle proprie esperienze vi aveva accennato chiaramente. La comparsa delle macchine magneto e dinamoelettriche, aprendo all'elettrologia il campo pratico delle applicazioni industriali, richiamò l'attenzione sui fenomeni succitati, e un'ingegnosa modificazione delle pile secondarie di Planté, fu presentata all'Esposizione di Parigi 1881 sotto il nome di Accumulatori Faure, coi quali la Società belga *Force et lumière*, che ne possedeva il brevetto, annunciava

Digitized by Google

pomposamente col nome stesso degli apparecchi, la soluzione del grande problema dell'immagazzinamento dell'energia.

Come era naturale la comparsa dell'accumulatore Faure fu accolta con entusiasmo, e, prima ancora che delle esperienze accurate avessero giudicato della bontà della cosa, della realtà delle promesse, gli accumulatori si fecero strada fra i pratici. I brevetti si moltiplicarono, le modificazioni, più o meno logiche, si seguirono per qualche tempo con un chiasso molto sproporzionato al valore effettivo degli apparecchi brevettati e anche, come vedremo, della stessa soluzione teorica del problema che si propongono.

Gli elettrodi di una pila secondaria o accumulatore sono dunque costituiti, per offrire all'azione formatrice una larga superficie e diminuire la resistenza interna, da due lunghe strisce di piombo ripiegate a spirali concentriche (mantenute equidistanti da bastoncini di ebanite), o da una serie di lamine piane alternatamente ricoperte sulle due facce dello strato di materia bruna, immerse tanto le une che le altre nell'acido solforico diluito contenuto in un vaso isolante o in una cassetta di legno rivestita internamente di piombo. — Ciascuna cassetta, pesante nei tipi più comuni dai 25 ai 30 chilogrammi, può accumulare una somma diversa di energia a seconda della superficie utile di piombo e dello spessore dello strato di formazione — la forza elettromotrice di un accumulatore formato e carico non supera nelle migliori condizioni i 2,3 volts, è anzi ordinariamente alquanto minore (poco diversa da 2 volts). Gli elementi riuniti, come le pile per i poli contrari, possono fornire fra i due capi liberi dei salti di potenziale considerevoli, possono venir caricati nelle condizioni opportune per il minimo

Digitized by Google

spreco di energia dalla corrente di grande forza elettromotrice delle macchine dinamo elettriche — e restituire poi l'energia accumulata in condizioni diverse secondo il modo di accoppiamento durante la scarica. Vediamo, per quanto è possibile, di farci un concetto del valore pratico di questi apparecchi.

La teoria degli accumulatori viene esposta ordinariamente in un modo assai più semplice di quello che farebbero supporre le poche osservazioni fatte fin da principio. Si dice che l'ossigeno generato dalla scomposizione dell'acqua acidulata, attacca vivamente la lamina positiva che si copre di perossido di piombo, mentre l'altra è mantenuta, dall'idrogeno che vi si raccoglie, allo stato metallico puro. Riunendo poi le due lamine, dopo aver tolte le comunicazioni col generatore che aveva provocato la prima scomposizione, il processo chimico si inverte, il perossido si riduce da una parte mentre che dell'ossido di piombo si forma dall'altra.

Il perossido di piombo allo stato di estrema suddivisione ed aderente alle lamine positive, che il Planté otteneva col mezzo del lungo processo elettrolitico sopraccennato, Faure immaginò di applicarlo direttamente rivestendo di minio le lamine stesse ed evitando, o, più esattamente, rendendo assai più rapida, la così detta formazione dell'elemento. Che questa formazione elettrochimica sia però necessaria in ogni caso, risulta dalle esperienze recentissime di Aron, le quali confermando, e completando quelle precedenti di Gladstone e Tribe hanno, mi sembra, rimessa la questione al posto che le spetta veramente.

Lo strato di materia nerastra che ricopre la lamina positiva di un accumulatore formato, quantunque sia essen-

Digitized by Google

zialmente una combinazione di ossigeno e di piombo pure e per il colore e per il modo di comportarsi come polo positivo di una pila secondaria, offre delle differenze abbastanza notevoli col perossido deposto chimicamente. La forza elettromotrice di una pila secondaria la cui lamina positiva è rivestita di perossido depostovi per via chimica, sta a quello di un elemento formato come 1 a 1.4, e la costanza della corrente è assai minore, mentre che d'altra parte un elemento siffatto acquista le proprietà di un vero accumulatore dopo averlo, per alcuni giorni, sottoposto all'azione della corrente.

Tanto sulla lamina positiva come su quella negativa le reazioni elettrolitiche sono accompagnate dalla formazione alterna di solfato di piombo che avviene a spese dell'acido solforico diluito, la densità del quale cambia intanto continuamente, cresce durante la carica, diminuisce nella scarica.

Lo stato di estrema suddivisione nel quale deve trovarsi la superficie attiva di qualsiasi accumulatore e che è una condizione *sine qua non* del loro funzionamento, indica che le reazioni chimiche realmente utili si compiono nell'interno della massa suddivisa. L'azione chimica sarà tanto più viva, quanto più facilmente si potrà rinnovarvi il liquido di mano in mano che, scomponendosi, si esaurisce e perde nel medesimo tempo conduttività ed efficacia.

L'influenza di questo assorbimento capillare, e, assai probabilmente anche di quello di una certa quantità di ossigeno, che le esperienze dirette hanno provato essere trattenuto dal perossido durante l'azione elettrolitica, è naturalmente più viva al principio della scarica, quando si può dir tutti gli innumerevoli canaletti della massa spugnosa sono pieni di liquido attivo. Esso spiegherebbe dunque non

Digitized by Google

solo la prima azione delle pile secondarie sempre più energica di quella corrispondente alle condizioni di regime, ma anche uno dei fenomeni più curiosi che presenta la scarica di questi apparecchi e la collega, apparentemente con quella dei condensatori elettrostatici. Se qualche ora dopo di avere scaricato un accumulatore, si riuniscono di nuovo i capi del circuito, questo è percorso da una nuova corrente meno intensa e di durata minore della prima. La scarica completa non avviene che dopo parecchie interruzioni; durante il riposo si rinnova per diffusione il liquido trattenuto negli interstizi della massa spugnosa, si riproducono le condizioni necessarie perchè l'energia, accumulata a spese della corrente di alimentazione modificando la composizione della massa, possa esaurirsi completamente nella nuova combinazione.

Le conclusioni che si possono dedurre da questi fatti sperimentali, pur troppo, a quanto sembra, non troppo noti ai numerosi inventori di pile secondarie, sono molto importanti.

Il solfato di piombo, insolubile nell'acqua, cattivissimo conduttore, si mescola intimamente colla massa suddivisa, che costituisce lo strato superficiale delle lamine di tutti gli accumulatori, e involge le particelle conduttrici otturando nel medesimo tempo i canaletti capillari attraverso ai quali il liquido del bagno viene a contatto intimo cogli elettrodi. La presenza constatata di solfato di piombo nell'interno della massa di perossido dopo la scarica indica come la quantità formatasi durante un periodo, non si scomponga completamente nel periodo successivo e fa supporre che, a contatto dell'elettrodo positivo, il solfato di piombo si formi in parte per azioni chimiche secondarie derivanti dalla

Digitized by Google

corrente ma non soggette alla legge elettrolitica. Questa sostanza isolante accumulandosi con una certa rapidità, impedisce le reazioni successive, diminuisce la potenza accumulatrice dell'apparecchio e ne abbrevia considerevolmente la vita, mentre che la modificazione del liquido interposto fra gli elettrodi ne cambia, aumentandola continuamente, la resistenza.

Del peso totale di piombo e d'acido solforico diluito, che costituiscono un accumulatore, soltanto una piccola parte è realmente attiva; per quanto si cerchi di aumentare la superficie delle lamine bisogna pure che il piombo nè intaccato, nè disaggregato conservi un certo spessore perchè non riescano troppo fragili — ciò che riduce ad un limite assai basso la capacità dell'accumulatore ossia il numero delle unità di lavoro che esso può immagazzinare per ogni chilogrammo di peso complessivo [1]. L'estrema suddivisione della materia nerastra ne rende facile il distacco dalla lamina di piombo per le scosse inevitabili cui va soggetta quando lo si trasporta, e per l'azione meccanica che accompagna indubbiamente tanto la corrente di carica quanto quella di scarica. Il rimedio proposto di inviluppare la lamina positiva con sostanze porose non toglie completamente il difetto e aggiunge un nuovo svantaggio col rendere meno facile il rinnovamento del liquido nell'interno dei canaletti capillari. Per ciascun accumulatore poi v'ha un limite massimo di carica determinato dalla su-

[1] Secondo i dati più favorevoli la quantità d'energia accumulata arriva appena a 3500 chilogrammetri per ciascun chilogrammo di piombo — ne occorrono dunque 75 chilogrammi per fornire durante un' ora l'energia di un cavallo-vapore.

Digitized by Google

perficie delle lamine affacciate e dallo spessore dello strato suddiviso, oltre il quale il passaggio la corrente alimentatrice vi provoca delle azioni secondarie dannose che ne diminuiscono e la forza elettromotrice e la capacità per le cariche successive.

Tutte queste cause insieme concorrono ad abbassare il coefficiente di rendimento che, per la natura della doppia trasformazione, non può essere molto elevato e che dopo un periodo non troppo lungo di lavoro va diminuendo nelle scariche successive. — Da alcune esperienze del dott. Aron a questo proposito risulterebbe che il coefficiente di rendimento dal 68 % dei primi giorni, si ridusse dopo qualche settimana al 20 % e dell'elemento così danneggiato la lamina negativa era intatta mentre sulla positiva la materia nera era sostituita da una massa bruno-chiara e molle mescolata coll'8 % di solfato di piombo. Secondo altre esperienze, sotto questo rapporto forse più attendibili, il periodo efficace sarebbe assai più lungo, le scariche utili assai più numerose, ma d'altra parte alquanto più basso il coefficente di rendimento che andrebbe aumentando per qualche tempo coll'uso (probabilmente per un maggiore sviluppo della formazione) e diminuirebbe quindi rapidamente, appena il deposito di solfato di piombo assume delle proporzioni considerevoli. I risultati così sfavorevoli ottenuti dall'Aron sono forse in parte dovuti all'influenza di due fatti sperimentali di cui varrebbe la pena di accertare l'importanza con esperienze accurate. La proporzione assai diversa nella quale si formerebbe il solfato di piombo secondo l'intensità della corrente di carica, che sarebbe cioè tanto minore quanto più intensa la corrente e rapido il caricamento; l'influenza dannosa dello scaricamento spinto oltre un certo

Digitized by Google

limite. L'accumulatore una volta formato e caricato deve conservare permanentemente una certa carica. Quando la differenza di potenziale fra gli elettrodi si abbassa troppo al disotto dei 2 volts, qualche azione chimica secondaria, o la corrente stessa che lo attraversa, se è posto in serie con altri che conservino ancora una forza elettromotrice alquanto più elevata, ne disturbano l'azione interna in modo che, in brevissimo tempo, il salto di potenziale fra gli elettrodi si riduce a zero. L'elemento è passivo durante la scarica, richiede una somma assai più grande di energia per essere ricaricato, e quel ch'è peggio un nuovo periodo di formazione per riacquistare il coefficiente normale di rendimento. — È, come dissi, assai probabile, che la rapida diminuzione di effetto utile, la quale ha determinato nella massima parte dei casi l'abbandono degli accumulatori impiantati dapprima con tante speranze, sia dovuta in gran parte a queste condizioni sfavorevoli di lavoro alle quali un' esperienza più lunga e più accurata potrà probabilmente rimediare, ma ad ogni modo la formazione del solfato di piombo, il cambiamento continuo di resistenza, la difficoltà di determinare con esattezza il limite massimo di carica che non convien oltrepassare (per non citare che i principali degli inconvenienti che siamo venuti esaminando) spiegano pur troppo la nessuna diffusione di apparecchi annunciati con tanto chiasso, e come vedremo, richiesti, direi quasi necessariamente da un sistema completo di distribuzione. Il problema dell'accumulamento dell'energia non si può dire risolto; al programma della Società *Force ed lumiére,* di distribuire l'energia a domicilio caricando gli accumulatori nell'officina colla corrente di grandi generatori e trasportarli quindi presso i vari utenti si op-

Digitized by Google

pongono tali difficoltà tecniche, che basterebbero a farlo abbandonare anche quando tale proposta potesse reggere dal lato economico. — Ora, tenendo conto delle spese di impianto, di trasporto e di manutenzione degli apparecchi e prendendo per base i dati più favorevoli agli accumulatori, il prof. Galileo Ferraris trovò che l'unità di lavoro così distribuita verrebbe a costare almeno tredici volte dippiù che col sistema più costoso di trasmissione diretta per mezzo di gomene metalliche. Chi preferisse a quest'ultima, una distribuzione cogli accumulatori farebbe, per citare le parole stesse del prof. Ferraris, l'errore di chi credesse più economico distribuire alle case di una città l'aqua per mezzo delle secchie, al distribuirla con una tubulazione. — Ma l'errore sarebbe assai più grave nel caso della distribuzione d'elettricità perchè le secchie, costerebbero carissimo e sarebbero molto pesanti, e, aggiungiamo noi, per l'imperfezione inevitabile dell'isolamento, e le azioni interne che si compiono anche a circuito aperto, avrebbero una troppo stretta analogia con quella famosa delle Danaidi.

Che non si creda però che gli accumulatori attuali siano proprio arnesi inutili. — Quantunque una parte considerevole dell'energia accumulata si sperda inutilmente, la loro vita sia breve [1] e per le cure e la quantità di metallo che richiedono nella loro fabbricazione, riescano apparec-

[1] Pare che la durata media, di un accumulatore in buone condizioni, non arrivi oltre i 6 o gli 8 mesi — ammessa del resto anche la durata di circa 3 anni data dei vari inventori il rinnovamento in un lasso così breve di tempo basterebbe già a limitarne di molto l'impiego industriale.

Digitized by Google

chi piuttosto costosi in relazione all'effetto che se ne ritrae, essi possono tuttavia venir adoperati vantaggiosamente in tutti quei casi in cui la forza motrice disponibile troppo ben commisurata coll'impianto meccanico, non lasciasse un margine sufficente per distoglierne quella necessaria alla trasformazione elettrica durante il lavoro dell'officina — e specialmente nei casi in cui l'energia è somministrata da una caduta d'aqua. Il caricamento degli accumulatori durante le ore di riposo potrebbe bastare a fornire la corrente per l'illuminazione; la medesima quantità di luce verrebbe a richiedere una somma di energia meccanica assai più grande che non coll'impiego diretto della corrente del generatore, ma sarebbe, per compenso, ottenuta coll'utilizzazione di un lavoro altrimenti disperso.

Un'altra applicazione che è forse destinata ad un grande avvenire è l'illuminazione elettrica dei vagoni di ferrovia. — Gli accumulatori o caricati nelle stazioni, adoperando durante il giorno i generatori destinati all'illuminazione notturna, o (meglio) da piccole dinamo poste sul treno stesso e che potrebbero servendo da freno immagazzinare l'energia, che attualmente si consuma dannosamente in calore durante le discese e i rallentamenti, possono somministrare la corrente necessaria per l'alimentazione delle lampade nel treno, la quale, se fosse fornita direttamente da un generatore mosso dal treno stesso, cesserebbe all'arrestarsi di questo, e ne risentirebbe tutte le variazioni di velocità, o richiederebbe l'impianto di un motore speciale.

Esclusa dunque assolutamente la convenienza di risolvere coi soli accumulatori ad elettrodi di piombo il problema del trasporto e della distribuzione dell'energia, e senza prestar molta fede all'importanza industriale dei pochi esperimenti

Digitized by Google

fatti per applicarli direttamente alla locomozione dei carrozzoni dei tramways o di piccoli battelli, l'impiego di questi apparecchi nell'industria può esser anche attualmente vantaggioso in molti casi speciali quando venga fatta nelle condizioni opportune, delle quali ci riserbiamo di discorrere quando avremo detto qualche cosa dei sistemi di distribuzione. Se il romore destato dalla loro comparsa fu troppo superiore ai loro meriti intrinseci avrà servito a rivolgere di nuovo l'attenzione su una parte tanto importante del problema generale e le ricerche attivissime, che si stanno facendo in questo campo così poco esplorato, non mancheranno di portare dei frutti preziosi.

Digitized by Google

VII.

DISTRIBUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA.

Perchè una trasmissione d'energia, raggiunga lo scopo pratico al quale è destinata non basta che si conoscano e si raggiungano anche le condizioni di un buon rendimento.

È necessario che l'energia trasmessa possa venir distribuita a seconda dei bisogni, che gli apparecchi trasformatori siano affatto indipendenti gli uni dagli altri per modo che, qualunque sia il numero di essi che funziona ad un dato momento, l'energia somministrata a ciascuno corrisponda sempre alle esigenze, dirò così, individuali di lavoro.

Queste condizioni generali alle quali rispondono, in qualche modo, tutti i sistemi adoperati nell'industria, devono essere soddisfatte rigorosamente nel caso di una trasmissione elettrica. — L'istantaneità colla quale si modificano le condizioni generali di un circuito, il danno che questi cambiamenti repentini possono arrecare ai ricettori più delicati, come le lampade ad incandescenza o nel caso più generale ai prodotti della trasformazione, richiedono una soluzione tecnica rigorosa, la quale d'altra parte, deve es-

Digitized by Google

ser raggiunta economicamente, senza un consumo inutile di energia, trasformandone, nel generatore, una somma variabile, equivalente ad ogni momento a quella richiesta dai ricettori attivi.

Nella rapida corsa che abbiam fatto attraverso alle varie trasformazioni dell'energia elettrica, vedemmo come le condizioni di regime di ogni ricettore si possano riassumere nella costanza della corrente alimentatrice. In tutti la resistenza interna è, o costante necessariamente per l'indole stessa dell'apparecchio, o mantenuta tale da un'azione regolatrice (lampade ad arco); il consumo di energia è sempre rappresentato dal prodotto dell'intensità per il salto di potenziale fra i punti d'attacco. Questa analogia, che riunisce strettamente le varie trasformazioni, permette di sostituire l'una all'altra, di rappresentarne per esempio il valore nel circuito con una resistenza equivalente, per effetto della quale si converta in calore la stessa quantità d'energia somministrata nelle medesime condizioni potenziali. Nell'esaminare le condizioni di una distribuzione faremo dunque astrazione dalla forma di energia fisica nella quale vien trasformata quella della corrente, sostituiremo cioè nelle esperienze a ciascun ricettore una resistenza equivalente e ci limiteremo a determinare le condizioni perchè, in ciascuna, si sviluppi sempre la medesima quantità di calore. Le esigenze alle quali bisogna soddisfare in un impianto di illuminazione colle lampade ad incandescenza valgono per tutte le altre forme di energia di una distribuzione completa.

I ricettori possono venir alimentati con due disposizioni diverse caratteristiche del circuito, ciascuna delle quali richiede per quanto riguarda la distribuzione delle condizioni particolari della corrente.

Digitized by Google

Nella prima detta in serie, adottata (fig. 26) per le lampade ad arco differenziali, per i bagni elettrolitici, tutti i ricettori sono alimentati l'uno dopo l'altro dalla medesima corrente, che percorre l'unico circuito del quale tutti fanno parte — utilizzando, con tanti salti successivi quanti sono i ricettori attivi, e che possono avere valori diversi, la differenza totale di potenziale fra i poli del generatore. L'energia assorbita da ciascun ricettore è espressa dal prodotto dell'intensità comune della corrente per il rispettivo salto di potenziale.

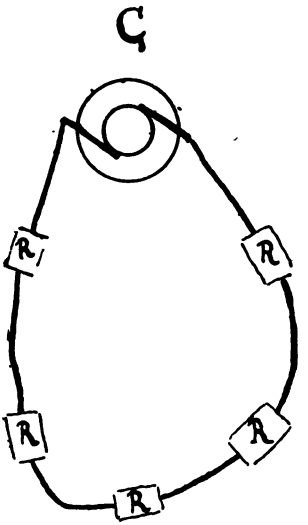

Fig. 26.

Le esigenze tecniche ed economiche della distribuzione saranno soddisfatte, quando, mantenendo costante la corrente si cambierà il valore della forza elettromotrice del generatore, affinchè il salto di potenziale fra i poli di questo corrisponda sempre alla somma di quelli dei ricettori attivi.

Nella seconda invece chiamata per derivazione (fig. 27) o per circuiti paralleli, che si applica di preferenza nell'illuminazione ad incandescenza, ciascun ricettore è posto su di un circuito separato i cui capi si attaccano o direttamente ai poli del generatore, o a grossi conduttori isolati ed in comunicazione diretta coi poli stessi. L'intensità della corrente in ciascuna derivazione dipende dalla resistenza propria del circuito parziale, mentre ha per tutti il medesimo

Digitized by Google

valore il salto di potenziale fra i due punti d'attacco. Il quale, perchè si raggiunga l'indipendenza dei singoli apparecchi, deve esser mantenuto costante qualunque sia il numero delle derivazioni attive, variando invece l'intensità della corrente che percorre l'anello e i conduttori principali e che sarà uguale alla somma delle intensità parziali delle varie derivazioni.

Sostituendo ai ricettori le resistenze equivalenti, entrambe le disposizioni si possono esprimere semplicemente colle variazioni della resistenza del circuito. L'introduzione di un ricettore nella disposizione in serie equivale ad un aumento della resistenza totale; la corrente alimentatrice non può esser mantenuta costante che crescendo la forza elettromotrice del generatore. Nella disposizione in derivazione la resistenza totale diventa invece tanto più piccola quanto più s'aumenta il numero dei circuiti attivi; il salto di potenziale fra i punti d'attacco, che tende a diminuire deve anche in questo caso esser mantenuto costante con un aumento della forza elettromotrice, per effetto della quale la corrente, nel circuito di resistenza più piccola, diventi più intensa.

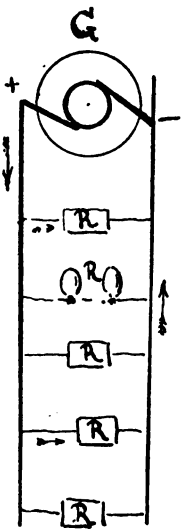

Fig. 27.

È dunque, come del resto si poteva prevedere, nel generatore che dovremo cercare la soluzione del problema, e precisamente nelle modificazioni della forza elettromotrice. Il valore di questa dipende, come ho detto fin dal principio, da tre elementi egualmente importanti. Il numero delle spire, o meglio la lunghezza del filo attivo del cir-

Digitized by Google

cuito mobile, la velocità di rotazione, l'intensità del campo magnetico. La resistenza interna è, per ciascun generatore, una quantità assolutamente costante e quindi fuori di quistione. Per uno degli assiomi più elementari di meccanica generale, l'uniformità del movimento è una condizione necessaria per il buon andamento di una macchina. Oltre che le variazioni di forza elettromotrice che si potrebbero ottenere coi cambiamenti di velocità, dovendo esser comandate da un apparecchio meccanico, sarebbero sempre troppo lente, anche quando si potessero ritenere sicure. Non rimane dunque che il campo magnetico, la cui intensità dipende direttamente da quella della corrente che percorre le spire dell'elettromagnete, e che, con una opportuna disposizione di circuiti, può venir regolata a seconda dei bisogni della distribuzione, senza l'intervento di apparecchi speciali.

Insieme all'intensità della corrente eccitatrice, concorrono però a determinare quella del campo fra i poli d'un elettromagnete il numero delle spire che circondano il nucleo, le dimensioni, il peso, la natura di questo. Per il medesimo nucleo, entro certi limiti di intensità di corrente, il campo è proporzionale al prodotto di questa per il numero delle spire, purchè queste occupino intorno ad esso il medesimo volume, di modo che potremo creare un campo di straordinaria potenza con correnti di poca intensità aumentando considerevolmente il numero delle spire di filo sottile. D'altra parte, a pari valore di questo prodotto, chiamato da taluni forza magnetizzante, il campo è tanto più intenso quanto più grande la massa del nucleo specialmente nelle vicinanze dei poli; due proprietà che furono messe a profitto colla solita sagacia dall'Edison nelle grandi macchine destinate agli impianti centrali di illuminazione, nelle quali

Digitized by Google

con una corrente di poca intensità si creano i campi magnetici più intensi che si conoscano.

Lasciando anche questa volta, da parte tutto ciò che si riferisce piuttosto alla costruzione che al funzionamento della macchina, vediamo come varia, tra i poli di un dato elettromagnete, l'intensità del campo cambiando quella della corrente che ne percorre le spire, deducendone i valori dallo sforzo col quale è attirata una massa di ferro dolce. La distanza fra l'áncora, come la si chiama comunémente, ed i poli si mantiene sensibilmente costante, lo sforzo è misurato dalle deviazioni piccolissime dell'indice di un dinamometro ingrandite da un apparecchio di proiezione; l'intensità della corrente da quelle di un indice galvanometrico.

Lo sforzo fra l'áncora ed i poli non è proporzionale all'intensità del campo ma, dipendendo dall'azione reciproca delle due masse affacciate, varia più rapidamente e accentua meglio i caratteri più salienti della legge. Finchè la corrente è debole (pochi decimi di ampère) l'intensità del campo cresce, per piccoli aumenti di questa, assai rapidamente, e mentre l'indice del galvanometro segna passando dall'una all'altra divisione un aumento di circa $^1/_{10}$ di ampère quello del dinamometro scorre su parecchie divisioni, ciascuna delle quali equivale ad uno sforzo di circa 250 grammi; di mano in mano poi che la corrente si rinforza la differenza di cammino fra i due indici diventa minore; ora che il galvanometro indica una corrente di circa 30 ampères, l'indice del dinamometro rimane quasi immobile per un avanzamento del primo che, al principio dell'esperienza, lo avrebbe spostato di un buon numero di gradi. L'intensità del campo magnetico va con aumenti sempre più

Digitized by Google

piccoli, avvicinandosi lentamente ad un valore massimo, oltre il quale le variazioni di intensità della corrente eccitatrice non hanno alcuna influenza sul nucleo, che si dice allora allo stato di saturazione. Non è, cioè, capace di magnetizzarsi più fortemente, e l'aumento lentissimo d'intensità del campo si deve soltanto all'azione propria della corrente più forte che percorre la spire dell'elica.

Perchè dunque l'intensità del campo di un elettromagnete segua le variazioni della corrente eccitatrice, è necessario che il nucleo sia lontano dal punto di saturazione che, cioè, l'intensità normale della corrente sia relativamente debole rispetto alla massa di questo, dalla quale, insieme che dalla sua struttura interna dipende il valore della prima che corrisponde al massimo di magnetizzazione. Ecco dunque una prima condizione importantissima che dovrà essere soddisfatta dagli elettromagneti di un generatore perchè si possa variarne l'intensità del campo magnetico, ed ottenere quindi, senza cambiamenti di velocità, dei valori diversi della forza elettromotrice.

Esaminiamo brevemente, prima di proseguire, come avvenga in pratica questo eccitamento, giacchè gli è appunto approffittando delle attitudini diverse dei singoli tipi di macchine, risultanti dalle varie disposizioni degli elettromagneti rispetto al circuito principale, che si riuscì a soddisfare in modo teoricamente perfetto, alle esigenze di una distribuzione di energia.

Per quanto sia puro il ferro del nucleo di un elettromagnete esso partecipa sempre, più o meno, alla proprietà caratteristica dell'acciaio di conservare, cioè, dopo essere stato magnetizzato, qualche residuo di polarità magnetica. Fra i poli di un elettromagnete inattivo a nucleo di ferro

Digitized by Google

si può verificare assai facilmente l'esistenza di un debolissimo campo magnetico facendovi girar rapidamente l'anello di un generatore di cui si chiuda esternamente il circuito, mentre quello dell'elettromagnete rimane interrotto. La deviazione immediata dell'indice di un galvanometro rivela una debole corrente dovuta alla presenza di alcune linee di forza attraverso al cammino percorso dalle spire del circuito mobile.

Senza arrestare il movimento dell'anello posso ora, per mezzo di un commutatore, introdurre improvvisamente nel circuito il filo che si avvolge sul nucleo; la corrente debolissima percorrendone le spire rinforza il campo già esistente fra i poli, cresce il lavoro ad ogni giro dell'albero e una corrente più intensa è lanciata nel circuito. In corrispondenza a questo aumento di corrente il nucleo si magnetizza rapidamente, cresce con altrettanta prontezza l'intensità del campo ed insieme con essa lo sforzo necessario a mantenere in movimento l'anello e la corrente generata dalla trasformazione d'energia. Una parte della quale si spende per mantenere il campo magnetico necessario alla trasformazione senza ricorrere, come abbiam fatto nelle nostre esperienze, alla corrente di un generatore indipendente.

Rimanendo costante la velocità di rotazione, e la resistenza del circuito esterno, la macchina raggiunge in pochi istanti una condizione di regime, caratterizzato dalla costanza assoluta della corrente prodotta. L'intensità della quale, o, per esprimermi così, l'altezza della condizione di regime dipende per il medesimo elettromagnete dalla velocità dell'anello, e dalla resistenza del circuito esterno e, per ciascuna coppia di valori di questi due elementi, ha un va-

Digitized by Google

lore fisso, determinato dalla natura stessa del fenomeno. Siccome non è raro il caso di trovare, specialmente nei trattati elementari, attribuito lo stato di regime alla saturazione del nucleo dell'elettromagnete non sarà inutile che ci fermiamo un momento per constatare l'inesattezza e, direi quasi, l'assurdità, di una tale spiegazione; ce ne possiamo convincere con un'esperienza semplicissima.

Alla corrente generata dalla dinamo (come vengono chiamate queste macchine abbreviando il nome di dinamo-elettriche proposto da W. Siemens, che, contemporaneamente a Wheatstone ne formulò il principio) sostituiamo nell'elica dell'elettromagnete, cambiando la posizione del commutatore, quella fornita da un generatore indipendente. Quando questa abbia la stessa intensità della prima, le condizioni di lavoro non sono cambiate. Se gli elettromagneti fossero vicini al punto di saturazione, un cambiamento, anche abbastanza considerevole, nell'intensità della corrente eccitatrice non dovrebbe influire sensibilmente sul valore della corrente prodotta, giacchè, come abbiam visto, l'intensità del campo magnetico conserverebbe, come la velocità di rotazione, un valore costante. Ora, appena l'indice del galvanometro posto nel circuito degli elettromagneti si sposta, vediamo deviare nel medesimo senso anche quello che misura l'intensità nel circuito del generatore. Le variazioni non possono derivare che dalla mutata intensità del campo, i cui elettromagneti devono quindi trovarsi abbastanza lontani dal punto di saturazione.

Qual'è dunque la causa che determina in ogni caso particolare il regime della macchina dinamo-elettrica?

Le linee di forza nello spazio in cui si muove l'armatura della macchina non conservano durante l'attività nè lo

Digitized by Google

stesso andamento nè la stessa frequenza che posseggono nel campo provocato dall'elettromagnete quando l'anello è immobile. La corrente che ne percorre le spire provoca intorno ad esso un campo magnetico, il quale tende ad eccitare nei nuclei una polarità opposta a quella determinata dalla forza magnetizzante dell'elica, l'intensità reale del campo risulta dal conflitto delle due azioni contrarie; le condizioni di regime si raggiungono appunto quando le due influenze si compensano in una specie di equilibrio mobile [1].

Le condizioni del campo magnetico nelle macchine dinamo-elettriche sono dunque intimamente collegate con quelle del circuito esterno in modo da risentire immediatamente l'effetto delle variazioni che vi sarebbero provocate dai cambiamenti di resistenza corrispondenti all'introduzione o alla soppressione di un numero qualunque di ricettori.

Esaminiamo sperimentalmente i vari casi che si possono presentare cominciando, per completare la serie e raccogliere gli elementi che ci occorrono dalle macchine magneto-elettriche a calamite permanenti o ad elettromagneti eccitati da correnti indipendenti.

Dai poli di ciascun tipo di macchine partono i capi del circuito del quale possiamo variar la resistenza introducendo o togliendo ad una ad una, una serie di spirali di

[1] Gli è appunto per controbilanciare l'azione smagnetizzante dell'armatura percorsa, nelle sue grandi dinamo, dalla enorme corrente di 840 ampères che Edison dovette ingrossare straordinariamente i nuclei degli elettromagneti, i quali sono composti di masse di ferro di parecchie tonnellate.

Digitized by Google

filo di ferro. Un galvanometro inserito nel circuito segna l'intensità della corrente, mentre un altro posto su di una derivazione di grandissima resistenza fatta tra i poli nel generatore indica le differenze di potenziale [1].

Finchè la resistenza esterna è assai piccola, minore o poco diversa di quella del circuito mobile, una corrente di grande intensità percorre il circuito mentre è piccolo il salto di potenziale fra i poli; di mano in mano che la resistenza aumenta, gli indici dei due stromenti si muovono in senso contrario, l'intensità decresce mentre aumenta continuamente la differenza di potenziale e, a parità di velocità dell'anello, anche la forza elettromotrice del generatore, giacchè, insieme all'intensità della corrente diminuisce la reazione del campo dell'anello sul campo degli elettromagneti. Di mano in mano che si va accentuando la sproporzione fra la resistenza esterna e quella interna le variazioni del salto di potenziale fra i poli diventano per gli stessi cambiamenti di resistenza continuamente più piccole.

Sostituendo adesso al generatore magneto-elettrico, una dinamo cogli elettromagneti in serie, eccitati cioè dall'intera corrente generata dalla rotazione dell'anello (fig. 28) quando la resistenza del circuito esterno è grandissima, la corrente di regime riesce ben poco più intensa di quella generata dal campo residuo, praticamente si dice che la dinamo non si eccita; di mano in mano che la resistenza

[1] La misura della differenza di potenziale si ottiene da quella dell'intensità della corrente abbastanza debole per non influire sensibilmente sulle condizioni generali, che percorre il circuito derivato di resistenza costante e dipende evidentemente soltanto dal salto di potenziale fra i due capi.

Digitized by Google

diminuisce crescono insieme l'intensità e la differenza di potenziali, quest'ultima più rapidamente da principio, a cagione dell'aumento d'intensità del campo in corrispondenza alla corrente più energica e quindi, con aumenti continuamente più piccoli, raggiunge un valore massimo dopo il quale decresce lentamente. L'avvicinarsi dei nuclei al punto di saturazione e specialmente l'influenza sempre maggiore del campo dell'elica su quello degli elettromagneti elidono l'effetto dell'aumento continuo di intensità della corrente che accompagna le diminuzioni ulteriori di resistenza.

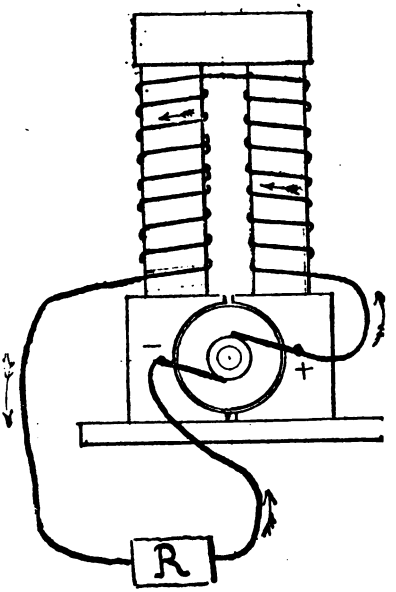

Fig. 28. — *Dinamo in serie.*

Ripetiamo l'esperienza con un'altra dinamo i cui elettromagneti sono eccitati da una parte soltanto della corrente generata. Le spire che circondano i nuclei (fig. 29) sono poste su di un circuito derivato direttamente fra i poli della macchina. Il circuito esterno si compone dunque di due parti distinte quello, che potremmo chiamare della distribuzione, di resistenza variabile secondo il numero dei ricettori attivi, l'altro degli elettromagneti di cui per ora supponiamo fissa la resistenza e nel quale l'intensità della corrente dipende dalla differenza di potenziale fra i poli. La resistenza del

Digitized by Google

circuito esterno può, finchè è assai grande rispetto a quella dell'anello, variare entro limiti abbastanza estesi senza che muti di molto la differenza di potenziale mentre cambia invece l'intensità della corrente. Di mano in mano che la resistenza diventa più piccola e specialmente quando questa non è troppo diversa di quella del circuito mobile cresce la sensibilità del generatore. Il valore assoluto del salto di potenziale fra i poli è minore di prima, l'intensità della corrente nel circuito della distribuzione è molto più grande. Ma, ad ogni aumento della resistenza di questo, diventa più grande la porzione della corrente totale che passa nell'elica magnetizzante. L'aumento di intensità del campo magnetico fa crescere insieme la differenza di potenziali fra i poli e l'intensità della corrente nel circuito della distribuzione.

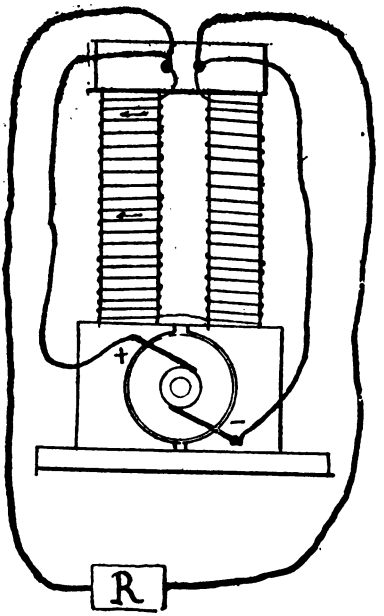

Fig. 29. — *Dinamo in derivazione.*

In nessun caso adunque un generatore magneto o dinamo-elettrico può da solo soddisfare alle esigenze di una distribuzione alla costanza richiesta nell'intensità dai ricettori in serie della corrente, quella nella differenza di potenziale fra i poli, per la disposizione in circuiti deri-

Digitized by Google

vati. Entrambe cambiano continuamente con legge diversa secondo il rapporto che passa fra la resistenza esterna e quella interna, ed il modo di eccitamento del campo magnetico.

M. Deprez ebbe l'idea felicissima di raggiungere l'effetto desiderato coll'accoppiamento di due tipi di macchine nei quali le opposte variazioni avvengono entro tali limiti che si compensino. Un aumento di resistenza, che determina un aumento del salto di potenziale fra i poli di una macchina magneto-elettrica, produce, fra quelli di una dinamo cogli elettromagneti in serie, l'effetto opposto.

Avvolgiamo ora attorno al nucleo dell'elettro-magnete due spirali parallele; lanciamo nell'una la corrente costante di un generatore indipendente, nell'altra quella prodotta dalla rotazione dell'armatura della nuova macchina. Questa è nel medesimo tempo magneto e dinamo-elettrica, di mano in mano che, diminuendo la resistenza del circuito esterno, cresce l'intensità della corrente generata la differenza di potenziale fra i poli è mantenuta costante dall'aumento dovuto alla dinamo, che compensa le diminuzioni della porzione magneto-elettrica. Aumentando la resistenza esterna le parti si invertono, quest'ultima tende a produrre un salto più forte di potenziale che equilibri l'abbassamento dovuto, nell'altra, alla diminuzione di intensità della corrente prodotta. Attacchiamo ora fra i poli un numero qualsiasi di circuiti derivati, la resistenza totale diminuisce come sappiamo coll'aggiunta di un nuovo ricettore, aumenta togliendolo. Perchè si raggiungano le condizioni tecniche ed economiche di una distribuzione è necessario che la corrente prodotta aumenti d'intensità nel primo caso, diminuisca nel secondo, e si mantenga invariata la differenza

Digitized by Google

di potenziale fra i punti di attacco, condizioni che rispondono perfettamente a quelle che si verificano coll'accoppiamento ora esposto, senza l'intervento di qualsiasi apparecchio regolatore, senza cambiare la velocità della macchina che, insieme all'intensità della corrente indipendente, deve essere fissata nei casi particolari a seconda dei bisogni da soddisfare.

Coll'accoppiamento d'una dinamo in derivazione con una macchina magneto-elettrica si raggiungono invece le condizioni richieste dalla distribuzione in serie — l'intensità costante della corrente alimentatrice accompagnata dal cambiamento del salto di potenziale. Abbiamo visto come un aumento di resistenza del circuito esterno, che diminuisce l'intensità della corrente generata da una macchina magneto-elettrica, aumenti invece quella di un dinamo in derivazione, mentre in entrambe cresce la differenza di potenziale fra i poli. Delle due eliche avvolte attorno ai nuclei della macchina doppia da M. Deprez, una è ancora percorsa dalla corrente costante di una dinamo indipendente, l'altra è posta in derivazione sui poli del generatore composto; come nella prima disposizione, quando siano scelte opportunamente l'intensità della corrente esterna e la velocità dell'anello, gli effetti simmetrici si compensano e la corrente rimane perfettamente costante comunque si vari la resistenza del circuito, o il numero dei ricettori attivi disposti in serie.

L'accoppiamento di due tipi di macchine realizzato dal Deprez colla doppia elica magnetizzante può esser ottenuto, più semplicemente, costruendo, come fecero Ayrton e Perry, il nucleo con una serie di lamine alternate di ferro e d'acciaio — quest'ultime rimanendo magnetizzate

Digitized by Google

permanentemente costituiscono la parte magneto-elettrica del generatore mentre le altre formano il nucleo della dinamo.

Non avendo a disposizione delle macchine composte, possiamo verificare sperimentalmente l'esattezza delle conclusioni con una disposizione alla quale sarà forse praticamente data la preferenza in molti casi, poichè non richiede, come le precedenti, l'impiego di macchine speciali; non è altro che l'accoppiamento effettivo di due generatori opportunamente scelti ciascuno dei quali lancia nel circuito la propria corrente. Non s'è fatto altro che sdoppiare le macchine composte riunendo le due armature per i poli opposti con un filo di resistenza trascurabile, di modo che agiscono come una macchina unica la cui resistenza interna sia la somma delle due. La disposizione indicata nelle figure è evidente, gli elettromagneti della dinamo sono in serie (fig. 30) quando i ricettori sono in derivazione e si tratta di mantenere costante la differenza di potenziale, sono invece in derivazione (fig. 31) quando, essendo i ricettori in serie, si voglia costante l'intensità della corrente [1].

[1] Le esigenze di una distribuzione per circuiti derivati possono essere soddisfatte più semplicemente coll'impiego di una sola dinamo composta la cui doppia elica magnetizzante sia percorsa dalla corrente totale, e da una derivazione presa fra i poli della stessa macchina. — Abbiamo visto che, quando la corrente generata da una dinamo in serie supera una certa intensità, il salto di potenziale fra i poli decresce col diminuire della resistenza — accoppiamo ad una macchina, in quelle condizioni, una dinamo in derivazione nella quale la stessa causa faccia aumentare insieme e l'intensità e la forza elettromotrice ed avremo raggiunto le condizioni richieste dalla distribu-

Digitized by Google

Le macchine magneto-elettriche però, e le dinamo cogli elettromagneti in derivazione, offrono una soluzione approssimata che in molte circostanze può essere sufficiente, e che proposta sotto una forma un po' confusa, e una grande complicazione dall'ing. Gravier di Varsavia è una delle basi del sistema di distribuzione adottato dall'Edison per gli impianti centrali di illuminazione ad incandescenza. La soluzione oltre all'essere, come dissi, incompleta, e richiedere quindi l'impiego di un regolatore indipendente, non può esser applicata con successo che ad una distribuzione pei circuiti derivati, può soddisfare cioè abbastanza da vicino la condizione della costanza di poten-

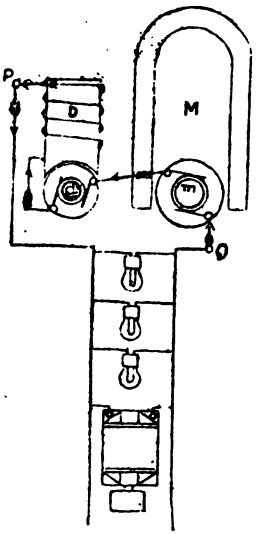

Fig. 30.

zione. La dinamo in serie però non lavora nelle migliori condizioni di rendimento, giacchè l'intensità opportuna del campo magnetico si ottiene con una corrente assai più intensa che non sia strettamente necessaria elidendone l'effetto coll'azione opposta di quella che percorre le spire del circuito mobile, e produce appunto l'abbassamento della forza elettromotrice in seguito ad una diminuzione di resistenza. — L'impiego però di una sola macchina, in luogo di due richieste dalle soluzioni più generali, compensa senza dubbio l'inconveniente ora accennato. Questa disposizione imaginata da Brush senza avere un'idea ben chiara dell'effetto che ne deriva, e con tutt'altro scopo, venne recentemente addottata dalla casa Siemens per le macchine a corrente continua destinate all'illuminazione.

Digitized by Google

ziale fra i punti d'attacco. La quale sarebbe assoluta, per qualunque valore della resistenza esterna se fosse possibile ridurre nulla la resistenza del circuito mobile. La forza elettromotrice del generatore che, come sappiamo, dipende unicamente dalla resistenza interna, dalla velocità di rotazione, dall'intensità nel campo, sarebbe in questo caso assolutamente identica al salto di potenziale fra i poli ove s'attaccano i capi dei circuiti derivati e perfettamente costante finchè non cambiano l'intensità del campo magnetico ed il numero dei giri. Cambiando la resistenza del circuito esterno, cambierebbe necessariamente l'intensità della corrente, sarebbe diversa quindi a seconda dei valori di questa, l'energia trasformata nel ricettore, ed in ogni caso equivalente alla somma delle trasformazioni, che si compiono in condizioni sempre eguali nei circuiti derivati attivi.

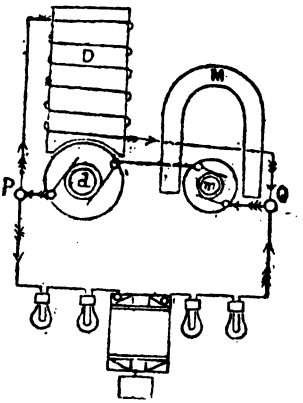

Fig. 31.

A queste condizioni, non realizzabili nella pratica, s'accostano, come risulta dalle esperienze che abbiamo fatte, la prima e la terza categoria di generatori quando sia grande la differenza fra la resistenza esterna e quella interna, e tanto meglio quanto più piccolo sarà il valore assoluto di quest'ultima, che, nelle grandi dinamo di Edison, si riduce a 7 millesimi di Ohm, mentre che la minima resistenza del circuito esterno, quando fossero accese tutte le lampade alle quali la macchina può fornir la corrente, è almeno 20 volte più grande.

Digitized by Google

Finchè dunque la resistenza esterna varia entro limiti che, come dico, possono essere abbastanza estesi, cambia l'intensità della corrente nel circuito mobile, ma le variazioni corrispondenti nel salto di potenziale sono abbastanza piccole perchè riescano praticamente inavvertite. Quando poi questi limiti, segnati nei casi particolari dalle esigenze della distribuzione, siano oltrepassati, entriamo nella fase di lavoro del generatore nella quale, come vedemmo, la costanza di potenziale fra i poli non può essere mantenuta che modificando l'intensità nel campo magnetico. Ciò che si ottiene nel sistema di distribuzione di Edison, mutando la resistenza della derivazione sulla quale son poste le eliche magnetizzanti, in quello proposto da I. Maxim cambiando l'intensità della corrente eccitatrice prodotta da una dinamo indipendente.

Entrambi i sistemi, oltre richiedere necessariamente la disposizione dei ricettori in circuiti derivati, hanno l'inconveniente irrimediabile di un'azione regolatrice indipendente, la quale, affidata da Edison all'attenzione di un uomo, dal Maxim alla azione automatica di un apparecchio elettromeccanico, può mancare da un momento all'altro, ed esige in ogni caso un impianto costoso e delicato la cui influenza sulle condizioni economiche non è certamente trascurabile. Darò brevemente un'idea dell'uno e dell'altro.

Le macchine dinamo-elettriche Edison sono del terzo tipo; le eliche degli elettromagneti sono percorse da una piccola frazione della corrente principale, derivata tra i poli del generatore. Quando la resistenza del circuito esterno diminuisce, per l'aumento del numero di derivazioni attive, oltre il limite della soluzione approssimata diventa più piccolo il salto di potenziale fra i punti d'attacco dell'elica

Digitized by Google

magnetizzante. La corrente vi si indebolisce precisamente quando dovrebbe eccitare più fortemente il campo magnetico. Se in questo momento diminuiamo la resistenza complessiva della derivazione, la corrente ridiventa più intensa, il campo magnetico e con esso la forza elettromotrice del generatore, crescono, e fra i punti d'attacco delle derivazioni, la differenza di potenziale ritorna quella di prima. La resistenza del circuito degli elettromagneti dovrà essere allora portata ad un valore intermedio, tale che la intensità della corrente eccitatrice corrisponda alle esigenze del consumo.

Nel circuito degli elettromagneti quando non siano attivi tutti i ricettori, o si può dire, nelle circostanze ordinarie, devono essere introdotte costantemente delle resistenze passive, le quali consumano in pura perdita una somma più o meno grande di energia che vi si converte in calore diminuendo il rendimento complessivo dell'impianto.

I cambiamenti del salto di potenziale sono palesati dall'intensità luminosa di una lampada tipo, o dal movimento dell'indice di un istromento simile a quello che adoperammo nelle nostre esperienze. Il cambiamento di resistenza a seconda delle indicazioni dell'avvisatore, si fa assai semplicemente spostando un manubrio su di una serie di contatti metallici a ciascuno dei quali corrisponde una resistenza determinata.

Il sistema apparentemente migliore è quello immaginato dal Maxim. Dico apparentemente, perchè basandosi sull'impiego ingegnosissimo d'un regolatore automatico, aggiunge all'imperfezione teorica comune coll'Edison, tutte le cause innumerevoli di disvio che affliggono necessaria-

Digitized by Google

mente tali apparecchi, e che, inavvertite, possono essere causa di inconvenienti gravissimi.

La macchina del Maxim è del 1° tipo, di quelle che abbiamo detto magneto-elettriche, ma a campo magnetico variabile, eccitato da una dinamo separata la cui corrente nei grandi impianti, può percorrere le eliche di parecchi generatori, riuniti per i poli omonimi collo scopo di rendere più bassa la resistenza interna. — È sulla macchina eccitatrice che agisce l'apparecchio automatico approfittando del fatto, cui abbiamo accennato nell'esposizione dei principii teorici, che, cioè, l'intensità della corrente prodotta cambia a seconda della posizione del diametro di commutazione o, in pratica, del punto di contatto delle spazzole sulle laminette del collettore. La corrente è massima, quando il diametro di commutazione è normale alle linee di forza, diventa sempre più debole di mano in mano che lo si sposta o da una parte o dall'altra. La macchina eccitatrice di Maxim non funziona nelle condizioni di massima intensità che quando il generatore, o il sistema dei generatori, di cui eccita il campo, trasforma la massima somma d'energia per cui sono destinati. Appena la corrente principale diminuisce di intensità per la soppressione di qualche ricettore, le spazzole comandate dall'apparecchio automatico si spostano, la corrente magnetizzante s'indebolisce e con essa il salto di potenziale fra i punti di attacco che, per effetto dell'aumentata resistenza esterna, tenderebbe ad aumentare. Il regolatore è comandato dall'azione di una coppia di elettro-calamite le cui eliche sono percorse da una corrente derivata fra i poli del generatore magneto-elettrico, e che attirano quindi, con uno sforzo variabile a seconda del salto di potenziale, un'an-

Digitized by Google

cora sottoposta. Per mezzo di un congegno meccanico facile a immaginarsi il movimento è trasmesso, con una serie di ruote dentate poste in moto direttamente dall' albero motore, al porta-spazzole mobile sull' asse, e che, una volta spostato dalla posizione della massima intensità, può avvicicinarsele o allontanarsele a seconda che i movimenti dell' áncora governati dalla molla antagonista avvengano in un senso o nell'altro.

La soluzione è, per quanto si riferisce al rendimento, teoricamente migliore di quella di Edison; le variazioni del campo magnetico si producono senza l' introduzione di resistenze passive, ma agendo direttamente sull' apparecchio generatore della corrente eccitatrice. In pratica però dubito molto che tale sistema possa essere largamente applicato, prima di tutto per la possibilità di ottenere i medesimi effetti nel modo più logico e più semplice proposto dalle soluzioni perfette di M. Deprez e affini, e per avere poi, anche in confronto a quello imperfetto di Edison, lo svantaggio inseparabile dall'automatismo meccanico, delle azioni lente e incerte per la stessa delicatezza del congegno adoperato.

Ed ora che abbiam visto come si risolva teoricamente la quistione, esaminiamo le difficoltà che si possono presentare nell' applicazione pratica, diverse nei due tipi di distribuzione e che, per quanto riguarda quelle per circuiti derivati, furono superate da Edison con disposizioni ingegnosissime.

Quando i ricettori sono posti in serie come le lampade ad arco differenziali, e che il generatore soddisfa per proprio conto alle esigenze del sistema, basta che l'esclusione di un ricettore non interrompa la corrente; ad ogni appa-

Digitized by Google

recchio deve essere unito un commutatore che permetta di riunire, con un filo cortissimo di resistenza trascurabile, i due punti della condotta principale ai quali s'attacca il ricettore momentaneamente escluso. Una disposizione di questa natura, apparentemente assai semplice e perfettamente pratica, finchè si tratta di piccole distribuzioni, può presentare delle difficoltà delle quali ora, per la mancanza di esempi pratici, non è possibile farsi un'idea concreta quando, applicando il sistema su vasta scala, siano molti numerosi gli apparecchi alimentati, e quasi impossibile la sorveglianza generale dei commutatori; il guasto accidentale d'uno dei quali basta per sospendere l'attività generale interrompendo il circuito principale.

In una distribuzione per circuiti derivati si incontrano difficoltà di natura diversa. Bisogna mantenere costante la differenza di potenziale fra i capi di ciascuna derivazione; ora è naturale che, non potendo tutti i ricettori essere posti ad eguale distanza dal generatore, il salto di potenziale veramente utile in ciascuno di essi non potrà essere lo stesso per tutti, se non a patto che siano eguali le resistenze (e diverse le dimensioni) dei fili che congiungono direttamente ciascun ricettore coi poli del generatore.

Nella disposizione schematica indicata nella (fig. 29) il salto disponibile per il primo ricettore sarà maggiore di quello che può venir utilizzato dal più lontano, e la differenza dipende dalla resistenza dei due grossi conduttori che partono dai poli. Di queste differenze, che possono essere trascurabili o ad ogni modo facilmente calcolate nel caso di piccoli impianti parziali, bisogna tener conto quando la distribuzione si estenda in una zona più vasta,

Digitized by Google

come nel caso degli impianti centrali di illuminazione ad incandescenza [1]. Siccome sono inevitabili delle differenze di salto di potenziale disponibile nei vari punti della rete, bisogna che le lampade abbiano nelle diverse regioni delle resistenze alquanto diverse — maggiori dove il salto disponibile è più grande perchè in tutte la corrente raggiunga l'intensità normale. Fissata, in base ai limiti estremi di resistenza interna delle lampade, la massima differenza fra i salti di potenziale disponibile, bisogna calcolare i conduttori in modo che, in nessun punto della rete, la forza elettromotrice fra i capi del piccolo circuito di una lampada, sia inferiore al minimo valore stabilito.

Edison, che per il primo rivolse l'attenzione su questo problema complesso, ne ideò una soluzione ingegnosa, studiata con cura in tutti i dettagli, e che in alcune parti, e particolarmente nella sostituzione delle determinazioni sperimentali alle calcolazioni laboriose, se non difficili, dei conduttori, è senza dubbio una delle migliori trovate del fecondo inventore americano.

Ecco sommariamente il sistema di canalizzazione adottato da Edison. Dai poli del generatore centrale (composto in pratica, quando il numero delle lampade da alimentare oltrepassa le 1200 alle quali la corrente è fornita

[1] Le dimensioni dei grossi conduttori necessarie per l'alimentazione di un dato numero di lampade cambiano secondo che i poli del generatore si attaccano tutt'e due dalla stessa parte, come è indicato nella figura o da parti opposte, o al punto di mezzo delle due sbarre. — Le sezioni dei conduttori starebbero nelle 3 disposizioni ora accennate rispettivamente fra loro come 1, $\frac{1}{2}$. $\frac{1}{4}$.

Digitized by Google

da una macchina unica, di parecchie grandi dinamo accoppiate coi poli omonimi) partono, in direzioni diverse, varie coppie di grosse sbarre di rame dette alimentatori (*feeders*), chiuse in tubi di ghisa e isolate accuratamente con un mastice di enorme resistenza. La regione da illuminare, che si può stendere con un raggio medio di quasi 600 metri intorno al generatore, è così divisa in tanti settori nei quali il consumo normale o almeno il numero presumibile di lampade contemporaneamente attive, sia press' a poco lo stesso. La sezione delle sbarre è calcolata in modo che, fra gli estremi liberi di ciascuna coppia, vi sia una differenza di potenziale leggermente superiore ai 102 volts richiesti dalla lampada normale. Dalle estremità libere di ciascuna coppia di alimentatori, di cui come vedremo or ora si determina sperimentalmente la posizione nella rete e che, rispetto al settore alimentato, sono i veri poli del generatore fra cui si mantiene costante la differenza di potenziale, partono i così detti conduttori principali (*mains*) di dimensioni minori, collocati come gli alimentatori sotto terra, chiusi come quelli in tubi di ghisa e deposti parallelamente alle case da una parte e dall'altra della via. Da questi si staccano le derivazioni secondarie, di dimensioni diverse secondo il numero delle lampade cui devono fornir la corrente e che si suddividono, nell'interno delle case, nelle ultime diramazioni su ciascuna delle quali è posto un ricettore.

Si capisce subito come, in una rete così complicata, sia della massima importanza la posizione dei centri di distribuzione, come si potrebbero chiamare gli estremi liberi di ciascuna coppia di alimentatori — specialmente riguardo alla spesa di impianto. Perchè una canalizzazione di questa natura sia industrialmente possibile non basta

Digitized by Google

che ciascun conduttore sia calcolato delle dimensioni opportune per la corrente che deve fornire, ma bisogna che questa esigenza sia soddisfatta coll'impiego di una serie di sbarre metalliche di dimensioni determinate e che si possano costruire correntemente senza la grave difficoltà industriale delle misure speciali — e d'altra parte col minor peso possibile di rame.

Sotto questo aspetto il metodo di calcolazione sperimentale, immaginato da Edison, è veramente mirabile per la semplicità e l'esattezza.

Costrutta, sulla pianta del quartiere da illuminare, una rete in piccola scala comprendente i condotti principali e le derivazioni di dimensioni proporzionali ai tipi stabiliti per l'alimentazione d'un numero determinato di lampade, la si fa percorrere dalla corrente di una pila costante e si determinano i salti di potenziale nei punti corrispondenti agli attacchi dei vari gruppi di lampade. A norma dei risultati dei primi tentativi si fissa la posizione e il numero dei punti, nei quali bisogna collocare le sorgenti parziali d'energia, perchè nei vari settori la distribuzione avvenga in modo uniforme, tale cioè, che fra i punti di attacco di due gruppi qualsiasi di ricettori la differenza fra i salti di potenziale non oltrepassi il limite richiesto per l'andamento normale e determinato dal tipo di lampada adoperato. — Sono questi i punti che nella rete effettiva corrispondono ai centri di distribuzione collegati dagli alimentatori col generatore centrale. Si evita con questo sistema non solo qualsiasi errore abbastanza facile in calcolazioni lunghe e complesse, ma si risolve d'un tratto e in modo sicuro il problema industriale.

A cagione dell'imperfezione teorica del sistema regola-

Digitized by Google

tore adottato, Edison dovette prevenire, con una serie di ripieghi gli inconvenienti che potrebbero nascere da uno squilibrio momentaneo fra la produzione ed il consumo, che è sempre possibile coll'impiego di regolatori separati, e sarebbe eliminato quando s'addottassero i sistemi più razionali di M. Deprez e affini. Ai punti d'attacco dei conduttori principali cogli alimentatori e delle derivazioni secondarie coi primi il conduttore è fatto con pezzi di lega metallica fusibile, chiamati valvole di sicurezza, destinate ad interrompere, fondendosi, il circuito appena la corrente superi un limite determinato [1]. In molti casi dei fili di

[1] L'utilità pratica di questi interruttori è assai discutibile. — Prima di tutto è assai difficile per non dire quasi impossibile, il garantire che la fusione avvenga proprio nei limiti fissati di intensità; la determinazione delle dimensioni del pezzo fusibile non può esser fatta che sperimentalmente giacchè non si conosce con che legge vari la resistenza di un metallo prossimo al punto di fusione, e si può esser certi che in quelle condizioni speciali molecolari sarà diversa di quella trovata per le temperature ordinarie — d'altra parte poi delle piccole differenze di purezza chimica, di struttura molecolare di dimensioni rendono tutt'altro che certi i valori determinati sperimentalmente su campioni isolati, quando si tratti di applicarli a pezzi apparentemente eguali. Di parecchi interruttori che ebbi occasione di sperimentare nemmeno uno fuse all'intensità per la quale era destinato, alcuni anzi a valori assai diversi. — Oltre a ciò, quand'anche l'interruttore funzionasse a dovere sembra che il rimedio proposto di interrompere le correnti per salvare le lampade piombando nel buio, all'improvviso e senza la possibilità di un pronto rimedio tutti gli utenti che ricevono la corrente dal condotto interrotto, non sia scevro di inconvenienti quasi altrettanto gravi quanto potrebbe esserlo la rottura di una lampada che si potrebbe facilmente sostituire quando la comunicazione al circuito principale non fosse tolto — e la forza elettromotrice ricondotta al valore normale dall'apparecchio regolatore.

Digitized by Google

ritorno mettono i centri di distribuzione in communicazione diretta colla stazione centrale e vi indicano cogl'opportuni strumenti la forza elettromotrice esistente.

Di tratto in tratto i conduttori principali omonimi di due coppie sono riuniti da un ponte in modo da formare un sistema solo. A questo modo l'effetto di un cambiamento repentino del numero di lampade attive su una coppia si diffonde in certo modo sull'altra, si rallenta la trasmissione dello squilibrio allargandolo in una regione più vasta, e si permette così all'impiegato che sorveglia il regolatore di introdurre o togliere dal circuito degli elettromagneti le resistenze opportune.

Quest'ultima disposizione veramente buona non sarebbe certamente da abbandonarsi anche quando la distribuzione venisse fatta con un sistema teoricamente perfetto, giacchè, come si sa, anche il cambiamento di intensità magnetica d'un nucleo esige un certo tempo, piccolissimo, ma tanto meno trascurabile quanto più grandi le masse magnetizzate.

Ora che abbiamo visto come sia risolta la questione tecnica fermiamoci un momento su un'altra parte del problema che tocca direttamente la questione economica.

Perchè una distribuzione di energia, sia pure soltanto quella dell'aqua o del gas a domicilio o della luce ad incandescenza nel quartiere di una città, sia possibile industrialmente, bisogna poter misurare il consumo, in base al quale si stabilisce la quota da pagarsi da ciascun utente. Nelle distribuzioni d'aqua ed anche in quelle di lavoro meccanico per trasmissione funicolare, l'impresa fornitrice determina spesso la quota di ciascun consumatore in base al consumo giornaliero di una data quantità d'aqua, nel

Digitized by Google

primo caso, fissata dalle dimensioni del robinetto di presa, nel secondo, d'una certa somma di cavalli al giorno, limitata dalla tensione dell'organo trasmettitore. Nell'uno e nell'altro non si misura effettivamente il consumo reale, si lascia l'utente libero di approfittare dell'energia disponibile entro certi limiti; la quota da pagarsi corrisponde naturalmente al consumo continuo, l'arresto degli apparecchi o del getto d'aqua, è a danno del consumatore. Il sistema, se offre dei vantaggi di semplicità e, fino a un certo punto, di sicurezza finanziaria per l'impresa, non si può dire che risponda all'ideale d'un sistema di misura. Un sistema invece, per quanto lo consentono le imperfezioni d'altro genere, inappuntabile è quello adottato dalle compagnie del gas. Il contatore misura effettivamente la quantità di gas che passa dalla condotta principale ai becchi di ciascun utente; il consumatore paga davvero in proporzione della luce adoperata, o per lo meno con una differenza tanto meno sensibile quanto più costante è la pressione nei condotti alimentatori. Nel caso di una trasmissione elettrica la questione si presenta colla necessità di una soluzione rigorosa — la perfezione dei sistemi di distribuzione esige altrettanta accuratezza nelle misure le quali, per l'indole diversa delle due disposizioni tipiche dei ricettori, sono affatto diverse nell'uno o nell'altro caso.

Esistono, e ne abbiamo adoperati parecchi nelle nostre esperienze, molti strumenti coi quali l'energia d'una corrente può venir misurata con esattezza scrupolosa, si può dire anzi che le misure elettriche si distinguono fra tutte per la sicurezza dei risultati e la semplicità di mezzi per ottenerli. Per mezzo delle azioni elettromagnetiche nei galvanometri, o come si chiamano adesso amperometri

Digitized by Google

o voltimetri, delle azioni elettrostatiche negli elettrometri, delle azioni elettrochimiche nei voltametri, si possono ottenere delle misure di intensità, di forza elettromotrice, di quantità d'elettricità coll'esattezza paragonabile a quella d'una bilancia squisita; e non è certamente questa una delle ultime cause che determinarono lo sviluppo prodigiosamente rapido di questo ramo di fisica tecnica.

Ma perchè le misure fornite da un apparecchio rispondano alle esigenze della pratica non basta che siano precise; esse devono essere registrate in modo da poterne facilmente controllare l'esattezza, e senza l'impiego di meccanismi complicati. Nel nostro caso poi l'indole del contatore dovrà essere diversa secondo il sistema adottato per la distribuzione, giacchè cambiano dall'uno all'altro le quantità da misurare.

Trattandosi di una distribuzione per circuiti derivati come quelle adottate generalmente per le lampade ad incandescenza, è costante il salto di potenziale, o per lo meno le differenze nei vari punti della rete, sono conosciute e non si estendono oltre limiti fissati. L'energia trasformata da ciascun ricettore, o gruppi di ricettori, durante un periodo determinato, sarà misurato dalla quantità di elettricità che in questo tempo, sarà passata tra i due capi del filo mantenuti a potenziale costante. Siamo in condizioni affatto simili ad una distribuzione di gas. Il contatore misura la quantità di gas che sotto la pressione costante o quasi è consumata dai singoli becchi o gruppi di becchi accesi. La soluzione più semplice, e che si presenta naturalmente per la prima, si fonda sull'impiego di un apparecchio elettrolitico della prima categoria, nel quale il peso di metallo che passa dall'anodo che si scioglie, al catodo che si in-

Digitized by Google

grossa, è precisamente proporzionale alla quantità di elettricità che attraversa l'elettrolito — e tale appunto è il contatore di Edison.

Due lamine di zinco eguali, sono affacciate ad una distanza scrupolosamente determinata (di circa 6 millimetri) e immerse in una soluzione di solfato di zinco. Ogni unità di elettricità, o come chiamasi oggi ogni coulomb, che attraversa il contatore, discioglie in un secondo 34,2 milligrammi di zinco della lamina positiva, e ne depone una egual quantità sulla negativa. Dalla differenza di peso, verificata a intervalli determinati, si deduce la quantità di elettricità trasformata nei singoli periodi, precisamente come dal numero dei giri della lancetta del contatore, si deduce il volume di gas abbruciato. Dalla condotta stradale entrano dunque nel contatore le due sbarre di rame destinate all'alimentazione delle lampade di ciascun consumatore, una di esse continua senza interruzione il suo cammino, l'altra è, nell'apparecchio, divisa in due parti di diversa resistenza — la corrente si biforca, e, come sappiamo, la quantità di elettricità che passa in ciascuna è proporzionale alla resistenza della porzione di circuito percorsa — la quale è per quello delle lamine di zinco nei contatori Edison 999 volte più grande dell'altro. Ogni coulomb che passa al secondo nel conduttore più grosso si deporrà sul catodo $\frac{1}{999}$ di 34,2 milligrammi, o assai prossimamente 1 milligrammo in un'ora di passaggio, nel conduttore principale, di una corrente continua e costante dell'intensità di 1 ampère — che, come ho detto parlando dell'unità di misura, è appunto definito come l'unità di intensità corrispondente al passaggio di 1 coulomb al secondo. Ora, una lampada Edison da 16 candele,

Digitized by Google

richiede una corrente costante di circa 0,75 di ampère — ogni ora di luce di ciascuna lampada sarà registrata dal contatore con un deposito di circa 0,75 di milligrammo sulla lamina negativa. La differenza di peso darà il numero di lampade-ore di illuminazione durante il periodo mensile o trimestrale che separa le ispezioni successive dei contatori.

Il funzionamento regolare del contatore esige però alcune condizioni che, nella pratica, si possono soddisfare soltanto incompletamente. Prima di tutto la frazione della quantità totale di elettricità, che passa per l'apparecchio, varia colla resistenza del piccolo circuito — la quale a sua volta può essere influenzata da molte cause, e non tutte possono venir compensate o eliminate. Si pensò, per esempio, a compensare i cambiamenti dovuti ai salti di temperatura. Approfittando del fatto che la resistenza della soluzione di solfato di zinco diminuisce col crescere della temperatura, mentre che quella dei metalli aumenta, si diedero alle due parti liquida e metallica di cui risulta il circuito del contatore lunghezze e sezioni tali che, nei limiti ordinari di temperatura gli aumenti di resistenza dell'una siano compensate dalle diminuzioni dell'altra. Una causa che non può mancare di avere una certa influenza è il cambiamento di densità del liquido per effetto delle azioni chimiche secondarie che accompagnano il fenomeno elettrolitico, come pure il cambiamento inevitabile di struttura superficiale delle due laminette di zinco affacciate, che può dar luogo a delle correnti locali, e alterare leggermente la distanza che le separa. Giacchè non si può supporre che il metallo tolto al catodo proprio si riproduca sull' anodo esattamente colla medesima disposizione. Tutte piccole

Digitized by Google

cause gli effetti delle quali possono solamente manifestarsi dopo un tempo abbastanza lungo, ma che acquistano importanza per il fatto che il contatore registra una frazione piccolissima dell'elettricità somministrata, di modo che le minime differenze possono introdurre degli errori tutt'altro che trascurabili nella valutazione dell'effetto reale [1].

Invece di misurare direttamente la quantità di elettricità somministrata, si può ottenerne il valore da quello della intensità media della corrente durante il medesimo periodo. A questo scopo furono proposti parecchi contatori dallo stesso Edison, da Ayrton, da Hopkinson, ecc., sotto la forma di piccoli ricettori magnetoelettrici, nei quali l'ar-

[1] Un inconveniente di natura affatto diversa può verificarsi col sistema adottato di pesare effettivamente le lamine dei singoli contatori la mancanza cioè apparente di controllo da parte dei consumatori. Perciò dall'Edison stesso e da altri sotto forma più semplice, si tentò di affidare la registrazione a un'azione automatica comandata dallo stesso apparecchio. Nel contatore automatico Edison vi erano quattro lamine invece di due, ciascuna coppia era immersa in una vaschetta separata. Agli estremi di un giogo di bilancia erano appese l'anodo della prima coppia da una parte, il catodo della seconda dall'altra, quando l'inclinazione del giogo determinata dalla differenza di peso, arrivava a un certo limite, un contatto invertiva la corrente nei due vasi, e le differenze di peso avvenivano in senso opposto — dal numero delle oscillazioni si deduceva il peso spostato. Più semplicemente fu sostituita alla bilancia una molla alla quale è attaccata una delle lamine foggiata a cilindro, che può moversi nell'interno d'un altro cilindro cavo formato dall'altra. Quando la prima cresce in peso tende la molla e sposta un indice in un senso, finchè la corrente si inverte e l'indice risale. Simili contatori automatici che parebbero più completi del primo, non vennero però finora applicati. Nell'impianto di illuminazioni Edison a Nuova York i contatori sono tutti del primo tipo e dànno, a quanto si dice, risultati soddisfacenti.

Digitized by Google

matura è fatta ruotare da una piccola frazione della corrente principale e delle disposizioni meccaniche, forse più ingegnose che pratiche, permettono di ridurre il numero dei giri, segnati su opportuni quadranti, proporzionale all'intensità della corrente. I cambiamenti però della forza elettromotrice inversa e del campo magnetico, a seconda della velocità e dell'intensità della corrente, rendono necessarie delle tarature accurate e complesse di cui non si può forse garantire l'esattezza dopo un periodo di lavoro.

La questione sarebbe assai più complicata, e si incontrerebbero delle difficoltà pratiche assai più rilevanti nel risolverla quando la distribuzione fosse fatta in serie. In questo caso, che non venne fino ad ora tentato, l'intensità della corrente rimane costante, e il lavoro trasformato da una serie di ricettori, si misura colla differenza corrispondente del salto di potenziale agli estremi. Ora questa misura per l'indole stessa della quantità da misurare, non si può avere altrimenti che sotto una forma potenziale, la tensione di una molla, l'inclinazione d'un ago, ecc., in tutti i modi è necessario che il contatore registri insieme la durata dei periodi, durante i quali il salto di potenziale si mantenne ad un valore determinato.

Il conoscere la serie dei valori assunti dalla forza elettromotrice durante un periodo determinato non basta per calcolarne il valore medio perchè l'importanza di ciascun termine, nel valor totale dell'energia, dipende insieme dall'altezza del salto di potenziale e dal tempo, durante il quale la quantità costante di elettricità che passa nel circuito ha restituito l'energia corrispondente alla caduta. Un contatore di questo genere esige necessariamente l'impiego di un apparecchio d'orologeria ciò che rende assai difficile

Digitized by Google

l'applicazione pratica di questi e dei pochi strumenti proposti per la misura registrata dall'energia totale.

I ricettori elettromagnetici devono poi, nell'industria, soddisfare ad un'altra condizione importantissima e che, a primo aspetto, parebbe difficile a conciliare con quella della distribuzione. Abbiamo visto ripetutamente nelle esperienze che alleggerendo il peso del freno sull'albero di un ricettore, la velocità di questo aumenta. Adoperando, per esempio, un piccolo motore Griscom il cui asse sia munito di un trapano per forare una tavola, la velocità dell'ordigno cambia secondo la resistenza; e potrebbe rompersi, se, mentre gira velocissimo a vuoto, fosse posto d'un tratto contro una tavola dura. Come già dissi parlando dei mezzi di regolar la corrente, la costanza di velocità è un elemento di prima importanza in qualunque macchina, e, nel caso di un ricettore magnetoelettrico, non può esser raggiunto che modificando, a seconda del lavoro, le condizioni della corrente alimentatrice. Uno dei primi mezzi proposti consiste nell'applicare sull'albero, o far comandare da esso, un regolatore a forza centrifuga di una forma particolare e senza dubbio assai ingegnosa. Una piccola coppa, contenente del mercurio nel quale pesca un capo del circuito totale o di quello dell'elettromagnete, gira comandata dall'asse del ricettore; la superficie liquida s'incurva tanto più profondamente quanto più grande la velocità di rotazione, e quando questa oltrepassa un certo limite, la curvatura è tale che il filo conduttore non è più immerso, la corrente s'interrompe e la velocità diminuisce — per riprendere poi appena il contatto sia ristabilito. Non si fa altro che restringere i limiti delle variazioni di velocità somministrando ad intervalli diversi secondo i bisogni, o tutta l'energia disponibile o nulla.

Digitized by Google

Un altro regolatore, detto periodico, imaginato da Ayrton e Perry, approfitta ancora della azione centrifuga per produrre lo spostamento di una spazzola di contatto lungo un manicotto rotante insieme coll'albero e diviso in due parti isolate da una linea sinuosa tale che, durante una rivoluzione, un arco più o meno lungo dell'una o dell'altra rimane a contatto della spazzola, secondo la posizione di questa sulla generatrice. Quando il ricettore è in riposo o si move assai lentamente, la spazzola è in tale posizione da appoggiare, durante un'intera rivoluzione su uno dei pezzi attraverso al quale passa la corrente alimentatrice senza incontrare resistenze. Appena la velocità cresce, la spazzola si sposta e durante una frazione più grande di giro, quanto più rapido il moto tocca l'altro pezzo per mezzo del quale si inserisce nel circuito una resistenza costante, che potrebbe essere anche un accumulatore. Attraverso ad essa la corrente è obbligata a passare prima di arrivare al ricettore che è così, in quella frazione variabile di giro, alimentato soltanto da una parte dell'energia totale. Quando la velocità ha oltrepassato il limite fissato, la spazzola si trova nella posizione opposta a quella di partenza, compie l'intera rivoluzione sul secondo pezzo, e la corrente alimentatrice passa, per tutto, il periodo attraverso la resistenza ausiliare prima di arrivare al ricettore la cui velocità diminuisce.

Un'ultima disposizione esclude addirittura l'impiego di un regolatore meccanico. È chiaro che se, appena diminuisce lo sforzo da vincersi dal ricettore, si facesse agire sull'albero di questo un freno che lo portasse ancora al valore di prima, la velocità rimarrebbe costante, solo una parte dell'energia elettrica verrebbe utilizzata nel la-

Digitized by Google

voro utile, la differenza variabile fra questo e la somma totale disponibile vince lo sforzo del freno. Un freno comune non farebbe altro che trasformarla in calore e non sarebbe di certo un sistema economico di regolatore; il freno imaginato da Ayrton e Perry restituisce questa parte di energia sotto forma di corrente che rientra nel circuito principale. Supponiamo che sull'anello mobile siano avvolti due fili in direzione opposta, lanciando la corrente nell'uno la macchina girerà in un senso, lanciandola invece nell'altro il movimento avverrà in senso opposto, in entrambi i casi, se il circuito inattivo fosse chiuso, sarebbe percorso da una corrente generata dal movimento dell'anello e diretto nello stesso senso di quella del circuito principale. Se i due circuiti hanno diversa resistenza e sono percorsi contemporaneamente dalla corrente alimentatrice, la rotazione dell'anello avverrà nel senso del circuito preponderante nel quale una parte dell'energia elettrica si converte in lavoro meccanico mentre che, per effetto della rotazione medesima e in misura tanto maggiore quanto più grande è la velocità, nell'altro circuito una parte di questo lavoro si riproduce come corrente la quale diretta nello stesso senso di quella che alimenta la macchina, rientra nel circuito. La resistenza del secondo circuito sia tale che la velocità normale della macchina corrisponda alla così detta velocità critica. Se si fa girar l'anello di una dinamo dapprima assai lentamente, e poi con velocità sempre crescente senza cambiare la resistenza totale del circuito, la corrente generata è, per un certo periodo, diverso secondo le macchine, debolissima finchè d'un tratto un piccolo aumento di velocità trasforma, per così dire, la macchina in un generatore relativamente potente. È questa

Digitized by Google

velocità, al disotto della quale la macchina è quasi praticamente inattiva e che oltrepassata dà luogo ad una trasformazione considerevole di energia, che si chiama la velocità critica. Si capisce allora che, appena la velocità dell'anello doppio oltrepassa la velocità normale il circuito-freno agisce potentemente, e riconduce subito la macchina a compiere il numero di giri pel quale è destinata. — Invece dell'anello doppio gli inventori avvolgono anche una doppia spirale intorno agli elettromagneti, modificando il campo magnetico con un artifizio analogo a quello adoperato pei generatori, solo che le due correnti, invece di essere dirette nel medesimo senso, sono dirette in senso opposto. È l'intensità del campo magnetico contrario a quello che determina la trasformazione in lavoro meccanico, che deve esser tale per cui la macchina, agendo come generatore, abbia precisamente il punto critico alla velocità normale. Allora appena questa aumenta diventa assai energica la corrente eccitatrice dell'elettromagnete del freno, e la velocità ritorna subito al valore normale — la disposizione dei due circuiti rispetto al circuito alimentatore varia naturalmente secondo che il ricettore sarà disposto in serie; o in derivazione l'azione del sistema regolatore è paragonabile a quello delle lampade ad arco differenziali, si restringono i limiti delle variazioni compensandone istantaneamente l'effetto.

Prima di lasciare quest'argomento dirò due parole dei regolatori dell'intensità luminosa applicata alle lampede ad incandescenza, e che, specialmente per la illuminazione dei teatri hanno una importanza capitale. Nel primo teatro illuminato colle lampade Swan, il Savoy Theatre di Londra, la casa Siemens, che fece l'impianto, risolse il problema in

Digitized by Google

modo indiretto — le 1200 lampade erano alimentate da sei macchine a corrente alternata, il cui campo magnetico era eccitato da altrettante piccole dinamo separate; ogni gruppo di 200 lampade divise in 4 serie da 50 era regolata introducendo delle resistenze nel circuito della macchina eccitatrice — all'indebolimento del campo magnetico corrisponde un abbassamento della forza elettromotrice, e per conseguenza della luce prodotta. Tale sistema, che è senza dubbio il più razionale, non è evidentemente applicabile quando la corrente sia fornita o da un solo generatore, o la si pigli da un conduttore principale di una distribuzione — l'unico mezzo possibile è allora l'introduzione di resistenze nel circuito dei gruppi di lampade di cui si vuol moderare l'intensità, resistenze che si fanno con fili, o liste ondulate di ferro o di pacfong di dimensioni tali che non si scaldino eccessivamente per il passaggio della corrente talvolta abbastanza intensa, e che sono disposte in modo da ottenere col semplice movimento di un manubrio, che scorre su una serie di contatti metallici, tntte le gradazioni di luce richieste dai bisogni della scena. Il sistema non è certamente economico, l'energia che non si utilizza nelle lampade, si converte inutilmente in calore nei regolatori. Non è, come si vede, che una soluzione provvisoria, che risponde perfettamente allo scopo quanto all'effetto che se ne ottiene, ma con un consumo d'energia che non migliora di certo le condizioni economiche di questo genere di illuminazione in confronto a quelli adottati comunemente.

Digitized by Google

VIII.

APPLICAZIONI — CONCLUSIONE.

Ora che abbiamo verificato sommariamente le condizioni fisiche del problema, che abbiamo esaminate le varie trasformazioni, e abbiamo visto come l'energia potenziale elettrica si trasmetta, si distribuisca, si misuri: vediamo di approfittare degli elementi raccolti per discutere brevemente la questione economica.

Per alcune applicazioni, quali sarebbero le industrie elettrochimiche, e sotto un certo aspetto l'illuminazione di grandi spazi colle lampade ad arco, gli effetti speciali che si possono ottenere passando per questa forma di energia risolvono, si può dire, la quistione indipendentemente da qualsiasi considerazione. L'elettrometallurgia è ancora ai primi tentativi; l'insufficienza delle nostre cognizioni riguardo alla natura intima del fenomeno, l'impossibilità nella quale ci troviamo, per ora, di raggiungere con mezzi pratici le condizioni opportune e principalmente di trasformare con processi industriali i prodotti greggi delle miniere in composti solubili atti, ad essere trattati nei bagni elettrolitici, ne limitano l'applicazione a pochi casi partico-

Digitized by Google

lari. Il vantaggio però dei processi elettrolitici in confronto ai processi termici comuni è teoricamente indiscutibile. Nella massima parte dei casi il sostituire al combustibile costoso, ingombrante, e della cui energia disponibile si può utilizzare anche coi migliori apparecchi soltanto una piccola parte, il sostituirvi, dico, l'energia delle cadute d'aqua che abbondano sempre nelle vicinanze delle miniere e l'utilizzare una frazione assai più grande di questa energia, senza paragone meno cara, basterebbero a decidere la questione, anche quando non vi fossero i vantaggi concomitanti di una purezza maggiore dei prodotti, di una utilizzazione più completa dei residui, che può da sola rappresentare nell'industria degli utili immensi. È questo un campo vergine ancora, nel quale l'elettrologia ha mosso i primi passi soltanto e che promette di riuscire forse tra i più fecondi; un campo nel quale l'utilizzazione bene intesa delle varie forme di energia può condurre a risultati stupendi, e intorno al quale si dovrebbe lavorare indefessamente in un paese, come il nostro, ricco di miniere, e di corsi d'acqua, ma povero di combustibile.

Le difficoltà che si incontrano nell'illuminazione colle lampade ad arco sono di indole affatto diversa, è piuttosto una questione di opportunità che di economia; i grandi fari elettrici di migliaia di candele forniscono senza dubbio la luce nelle migliori condizioni economiche che si possano realizzare dall'industria. Alla temperatura elevatissima, la massima che ci sia permesso di produrre, corrisponde intanto il massimo rapporto fra la radiazione luminosa e la radiazione totale in cui si converte l'energia somministrata, mentre che la piccola estensione relativa della parte incandescente rende minime le perdite accidentali; ma d'al-

Digitized by Google

tra parte queste stesse qualità, insieme alla ricchezza eccessiva di raggi molto rifrangibili, ai rumori che accompagnano l'arco, ne escludono assolutamente l'impiego in molti casi, e particolarmente nell'uso domestico. La luce delle lampade ad arco è essenzialmente industriale; con artifici simili a quelli adottati da Jaspar, può essere introdotta nelle grandi officine diffusa come la luce del giorno, e mantenendola abbastanza fissa perchè soddisfi pienamente ai bisogni di un lavoro paziente e minuzioso. Nella gran sala degli apparecchi trasmettitori e ricevitori dell'ufficio telegrafico centrale di Bruxelles un sistema ingegnosissimo di lenti e di specchi circonda il focolare luminoso e lo nasconde; la luce riflessa nelle direzioni opportune vi si diffonde dolcemente senz'ombre, come quella che cade da un soffitto di vetro quando il sole è velato da una nuvola chiara ed uniforme. La questione economica comincia a presentarsi quando si suddivida la luce in vari focolari d'intensità limitata. Le lampade differenziali sono da questo punto di vista assai inferiori ai cosi detti fari. Il vantaggio però di una distribuzione più uniforme, specialmente nei grandi spazi aperti, può compensare il costo maggiore dell'unità di luce e le fa preferire in molti casi alle prime.

Ad ogni modo le lampade ad arco hanno oramai nell'illuminazione un posto importante nel quale difficilmente potranno venir sostituite con vantaggio, formano una classe speciale di apparecchi che non può, nei limiti delle sue applicazioni naturali, temere la concorrenza degli altri sistemi.

Le cose camminano diversamente per le lampade a incandescenza. Il servizio ch'esse sono destinate a prestare, le

Digitized by Google

fosse, nella massima parte dei casi, in concorrenza diretta coi sistemi di illuminazione già in corso, e sfortunatamente in condizioni economiche troppo poco diverse, anche quando sono per il momento vantaggiose, perchè, da questo punto di vista si possa esser tranquilli sull'esito della lotta impegnata. Certo che il bisogno crescente e, per dire il vero, sfrenato di luce, le esigenze del lusso alle quali le lampade a incandescenza possono soddisfare in mille modi; l'esclusione quasi assoluta dei pericoli di incendio, la soppressione completa di prodotti della combustione che scaldano, ammorbano l'aria, rovinano le decorazioni; l'indole della luce rosea, tranquilla, d'un'intensità moderata, le circondano di tali vantaggi da porre, in molti casi, in seconda linea la questione del prezzo. Il quale però, nella parte che dipende dall'energia consumata nella trasformazione, potrà difficilmente variare di molto dai valori attuali. La temperatura alla quale può esser portato il filamento incandescente, ha un limite dal quale probabilmente non si è molto lontani. Per temperature più elevate lo scotimento molecolare, la sublimazione, renderebbero troppo breve la vita della lampada [1], mentrechè d'altra parte l'intensità luminosa o troppo viva, o troppo raccolta offenderebbe la vista. Il costo della luce a incandescenza potrà esser diminuito piuttosto abbassando il prezzo delle lampade, aumentandone il rendimento con opportuni perfezionamenti di fabbricazione, rendendo minori le spese d'impianto coll'elevare

[1] Un'altra causa che tende a rendere ancora più breve la durata utile di una lampada è l'appannamento interno del vetro, che è tanto più sensibile quanto più spinta la luce, e quindi più alta la temperatura del filo incandescente.

Digitized by Google

la resistenza del filamento incandescente ed alimentarle quindi con correnti meno intense e di più grande forza elettromotrice, spese che attualmente, trattandosi di grandi distribuzioni per uso domestico sono grandissime e bastano a rendere il prezzo della luce eguale o superiore a quello del gas, che si paga, come è noto *lippis et tonsoribus*, parecchie volte più caro di quel che si dovrebbe e che potrà quindi venir fornito, dalle ricchissime compagnie che lo producono, a prezzi assai minori quando la concorrenza del nuovo sistema di illuminazione assumesse delle proporzioni considerevoli. — I vantaggi accennati brevemente or ora, dovrebbero però bastare a decidere la questione in favore delle lampade a incandescenza tutte le volte che, come nel caso dei teatri, uno solo di essi, la sicurezza, può e deve valere dippiù di qualsivoglia economia.

Anche le lampade a incandescenza possono però essere un mezzo economico di illuminazione negli impianti isolati, nelle officine, quando l'energia da trasformarsi nella macchina elettrica venga fornita da un motore già in posto, utilizzando una parte di quella che qualunque macchina può produrre al disopra delle condizioni normali di lavoro; la spesa d'impianto del motore elettrico e dei conduttori essendo sempre abbastanza piccola il costo della luce riesce minore di quello richiesto dai sistemi adoperati comunemente. È in simili casi che possono riuscire utili e pratici anche gli accumulatori, specialmente quando l'opificio è alimentato dall'energia di una caduta d'aqua che si lascia defluire liberamente nel canale di scarico durante le ore di riposo; per quanto possa esser piccola la frazione dell'energia totale accumulata che può venir restituita, essa rappresenterà sempre un' utilizzazione mag-

Digitized by Google

giore dell'energia disponibile, un interesse attivo più elevato delle spese di impianto.

L'importanza della questione economica è massima, ed ha un valore assolutamente superiore a qualsiasi altra considerazione nella trasmissione elettrica del lavoro meccanico. Sia che si affronti il problema generale di grandi distribuzioni, sia che si voglia sostituire questo mezzo a quelli più comuni, l'unico criterio che può guidare nella scelta è il costo relativo dell'unità di lavoro, variabile a seconda delle circostanze e sul quale l'influenza del sistema di trasmissione può farsi sentire o direttamente, col rendere possibile l'applicazione di mezzi meccanici non permessa o troppo dispendiosa cogli altri metodi, o l'impiego di energia non utilizzabile coi sistemi ordinari, o indirettamente compensando il minor rendimento colla diminuzione delle spese di impianto e una serie più o meno grande di vantaggi laterali.

Quantunque il problema si possa dir nato da ieri, e siano nelle condizioni attuali abbastanza ristretti i limiti nei quali si possano applicare le condizioni poste dalla teoria, non mancano i tentativi di applicazioni industriali di cui dirò qualche parola prima di discutere sommariamente la questione generale.

Com'era naturale, i primi tentativi che seguirono assai davvicino le prime esperienze, ebbero appunto per iscopo l'applicazione del lavoro meccanico in condizioni tali che con altri sistemi di trasmissione, sarebbe stata o addirittura impossibile o di un impianto assai costoso e difficile. In un caso era un apparecchio perforatore, in un altro delle macchine di divisione, collocate a troppa distanza dal motore dell'officina per esserne attivati direttamente

Digitized by Google

che venivano posti in movimento con una coppia di macchine dinamoelettriche senza nessuna preoccupazione di rendimento. Pareva, ed era diffatti, un vantaggio abbastanza grande l'ottenere in queste condizioni speciali l'effetto desiderato.

Non fu che qualche anno più tardi, nel 1879, che si fece nella raffineria di zucchero di Chrétien e Félix a Sermaize (Marne) la prima applicazione industriale la quale, senza avere maggior valore delle altre quanto all'avanzamento della soluzione teorica, mostrò la possibilità di approfittare vantaggiosamente di questo sistema di trasmissione nei lavori agricoli. Le macchine operatrici rimanevano, come accade in queste industrie, assolutameute inattive durante circa otto mesi nei quali, ai lavori industriali dell'estrazione dello zucchero dalle barbabietole, succedono quelli agricoli di coltivazione di questo prodotto nelle campagne circostanti. Si pensò di utilizzare il motore con un sistema di aratura elettrica. Una macchina dinamoelettrica del tipo Gramme posta nell'officina, è comandata direttamente dal motore; due fili di 10 millimetri quadrati di sezione sostenuti da piccoli pali, conducono la corrente fino all'estremo del campo, dove due macchine dinamoelettriche sono disposte su carri speciali collocati ai due lati del terreno all'estremo dei solchi. Ciascuna macchina, alternativamente, pone in movimento con un sistema di ingranaggi un grosso tamburo attorno al quale si avvolge una fune metallica che trascina l'aratro fra un carro e l'altro. Appena questo è giunto al termine del solco, con un commutatore s'arresta la macchina, un semplice movimento di leva fa comandare dagli ingranaggi le ruote del carro, di modo che, chiudendo di nuovo il circuito, il carro si avanza dell'intervallo

Digitized by Google

corrispondente a circa tre solchi. La corrente è allora mandata alla macchina, che posta all'altro estremo del solco, su di un carro identico, lo fa dapprima avanzare, e quindi, comandando un tamburo eguale al primo, trascina l'aratro in direzione opposta all'antecedente; compiuti i 3 solchi i due carri si avanzano di un nuovo intervallo e l'aratro riprende il suo movimento.

La semplicità del sistema, studiato completamente in tutti i suoi dettagli fa di queste esperienze di Sermaize, una delle applicazioni più ingegnose della trasmissione elettrica di lavoro meccanico, la quale può essere suscettibile di un grande avvenire.

L'applicazione dei sistemi meccanici alla coltivazione, si fa su vastissima scala in molti paesi, si comincia a tentare con successo anche da noi. Ora si sa che tali impianti sono economicamente tutt'altro che perfetti — le macchine a vapore locomobili consumano molto carbone, esigono un servizio assiduo, hanno bisogno continuamente di aqua, la quale può talvolta nei mesi d'estate costar più cara del carbone, e in molti casi le difficoltà del procurarsela possono bastare ad escludere l'applicazione del sistema. L'impianto nelle grandi fattorie o nei gruppi di fattorie poste nel centro di grandi estensioni di terreno coltivato, di un motore fisso di sufficiente potenza, permette di realizzare un risparmio di combustibile sufficiente per compensare il minor rendimento della trasmissione elettrica in confronto a quella diretta, e una parte delle spese d'impianto, di cui il resto è più che equilibrato dalla soppressione delle spese considerevoli di approvvigionamento, dalle enormi diminuzioni di quelle di sorveglianza e di manutenzione. Nell'impianto di Sermaize la trasmissione

Digitized by Google

elettrica oltre che all'aratura (la quale può senza difficoltà venir continuata durante la notte inserendo nel circuito delle lampade ad arco) è impiegata per tutti i lavori accessori, a porre, p. es., in moto trebbiatoi che possono così lavorare al coperto, al sollevamento dei pesi durante il periodo di lavoro industriale dell'officina.

Nello stesso anno W. Siemens aperse un nuovo campo di applicazione esponendo a Berlino il primo modello di ferrovia elettrica immaginata per il servizio interno delle miniere, ed applicata, con leggiere modificazioni, alle carrozze pel trasporto dei passaggieri. Su di un piccolo carro era posta una dinamo del tipo Siemens di cui un polo era in comunicazione costante mediante uno strofinatore, con una sbarra di rame collocata fra le due rotaie parallelamente ad esse — l'altro per mezzo delle ruote era collegato metallicamente colle rotaie e colla terra. Ad uno degli estremi della linea la sbarra di rame s'attaccava ad uno dei poli di un'altra dinamo fissa, di cui l'altro era pure a terra — la corrente passa attraverso il ricettore in qualunque punto della linea si trovi il carro, finchè il commutatore posto a disposizione del capo treno tiene chiuso il circuito; il movimento dell'armatura si communica alle ruote, che girano con velocità variabile a seconda delle resistenze inserite nel circuito degli elettromagneti della macchina mobile. Poco tempo dopo lo stesso Siemens presentò un progetto più completo, nel quale la corrente era trasmessa direttamente dalle due rotaie ben isolate e collegate, ciascuna, ad un polo della dinamo fissa, destinato per una ferrovia, così detta aerea' a binari portate da colonne di ghisa dell'altezza di circa 4.50 m. Ciascuna carrozza doveva essere munita del proprio ricettore i quali sarebbero quindi stati disposti in al-

Digitized by Google

trettanti circuiti derivati tra i due conduttori principali formati dalle rotaie. Non avendo la Municipalità di Berlino accordata la concessione della ferrovia aerea nell'interno della città, la casa Siemens costrusse collo stesso sistema una ferrovia a livello del suolo tra Berlino e Lichterfelde, inaugurata nel maggio del 1881, per una tratta di circa due chilometri e mezzo.

Gli inconvenienti che possono nascere dall'adoperare le rotaie per condurre la corrente, quando la linea è a livello del suolo, sono troppo evidenti per meritare un lungo esame, la difficoltà dell'isolamento che diventa assai problematico in tempo di pioggia, l'imperfezione accidentale dei contatti, i pericoli nel caso di forza elettromotrice un po' elevata, necessaria quando si vogliano spingere le carrozze a grande distanza e con velocità considerevole, basterebbero quando non vi si potesse rimediare, per togliere molta parte dell'importanza pratica all'applicazione considerata astrattamente.

All'Esposizione di elettricità di Parigi nel 1881, la stessa casa Siemens attivò un servizio di trasporto, elettrico, tra la Piazza della Concordia e il Palazzo dell'Industria; la trasmissione fra le due macchine fissa e mobile, era fatta con una disposizione forse più ingegnosa che pratica, studiata per evitare appunto quella diretta colle rotaie che, in quel caso particolare era stata assolutamente esclusa dall'autorità municipale, e che dalla stessa casa Siemens era già stata abbandonata nel progetto della ferrovia elettrica tra Charlottenburg e Spandau. I conduttori che partono dai poli della dinamo fissa, sono fatti di due tubi di ottone fessi per tutta la loro lunghezza e sostenuti, parallelamente l'uno all'altro, da una serie di pali a una

Digitized by Google

certa altezza sul suolo. In ciascun tubo scorre un pezzo cilindrico a dolce sfregamento, collegato mediante una gomena metallica che passa attraverso alla fessura con uno dei poli del ricettore posto sulla carrozza. Il movimento di questa trascina i cilindretti, pel cui mezzo è mantenuto continuamente il contatto. Il sistema studiato accuratamente in tutti i particolari, è senza dubbio ingegnoso, ma se può venir applicato nel caso di un tranway a velocità moderata, non pare il più addatto per una soluzione generale e per grandi velocità.

Una disposizione senza dubbio più pratica, e destinata probabilmente ad un bell'avvenire, è quella immaginata dai due distinti elettricisti inglesi, Ayrton e Perry, della quale vidi l'anno scorso funzionare perfettamente un modello nella sala della Royal Institution. Uno degli inconvenienti più seri delle disposizioni ora esaminate, è il disperdimento inevitabile colla trasmissione mediante dei fili nudi, e che diventa necessariamente sempre più grande quanto più s'aumenta la lunghezza della linea. Ayrton e Perry pensarono di toglierlo od almeno di ridurlo ad un valore fisso indipendente dalla lunghezza, facendo la trasmissione con un canapo perfettamente isolato e che corra sotto terra parallelo alle rotaie. Una rotaia ausiliare, che occupa il centro del binario e viene sfregata da strofinatori posti sul treno, è divisa in una serie di sezioni, perfettamente isolate e dal terreno e fra di loro, ciascuna delle quali può esser posta in communicazione elettrica col conduttore principale dallo stesso treno durante il suo passaggio — e ridiventa inattiva appena questo sia entrato nella sezione successiva. È chiaro che il disperdimento è limitato alla lunghezza di rotaia ausiliare che forma una sezione, il cui isolamento

Digitized by Google

può esser fatto con molta cura, non dovendo essa reggere il peso del treno. Delle scatole di contatto sono poste all'ingresso e all'uscita di ogni sezione; il treno, al momento in cui passa, interrompe la communicazione con quella che abbandona, e collega al conduttore quella in cui entra non solo, ma con una disposizione ingegnosissima e che nel modello funzionava perfettamente, lo stesso apparecchio che opera la congiunzione elettrica della sezione attiva col conduttore principale, impedisce, finchè questa è occupata dal treno, qualsiasi communicazione elettrica fra il conduttore isolato e le due sezioni adiacenti di rotaie ausiliarie. La locomotiva elettrica di un altro treno che, mentre il primo occupa una sezione, entrasse in una di queste, non riceverebbe nessuna corrente finchè il primo, passando nella successiva, non l'abbia, come dicono gli autori, sbloccata. Un treno diretto, per esempio, che camminasse in coda ad un treno merci, non potrebbe raggiungerlo mai, quando le sezioni avessero una lunghezza sufficiente, perchè la quantità di moto immagazzinato, s'avesse ad estinguere percorrendola senza l'aiuto della corrente. Mentre il primo continua tranquillamente il suo cammino, l'altro corre rapidamente per un tratto, gli s'avvicina, ma si arresta poco dopo il suo ingresso nella sezione bloccata, la cui rotaia ausiliare non è, per così dire, inserita nel circuito che quando il treno merci è entrato nella sezione successiva.

Con sistema semplicissimo di fili di ritorno, che partono da diversi punti di ciascuna sezione, il treno può marcare automaticamente nella stazione di partenza e di arrivo il suo cammino.

Tecnicamente la questione si può dire risolta, i congegni immaginati hanno un carattere veramente pratico; l'isola-

Digitized by Google

mentó delle tratte di rotaia ausiliare componenti le varie sezioni (di una lunghezza media d'un paio di chilometri) può esser ottenuto con molta cura, togliendo insieme il pericolo derivante da contatti accidentali col limitare la lunghezza attiva — sarà dunque possibile l'impianto di ferrovie elettriche?

Una delle idee più feconde che fanno tanto grande il nome di Stephenson fu senza dubbio quella di adoperare, per la trazione sulle ferrovie, una macchina locomotiva che portasse cioè con sè l'energia sufficiente per trascinare il treno, invece d'adoperarvi quella di macchine fisse trasmessa o con mezzi meccanici o con aria compressa. La utilità pratica di questa idea sta appunto nell'aver tolto di mezzo le trasmissioni costose e ingombranti, che non avrebbero certo permesso lo sviluppo attuale delle reti ferroviarie.

Ma se Stephenson tagliò, per così dire, il nodo gordiano con un colpo di genio, l'idea fecondissima non è esente, dal punto di vista economico, di gravi appunti. La macchina pesante deve essere pure posta in movimento con un consumo inutile di energia, che, per le condizioni stesse dell'apparecchio vien trasformata in condizioni sfavorevoli. Il consumo di carbone per ogni cavallo è nella locomotiva assai superiore a quello delle macchine fisse, le riparazioni degli organi mobili senza paragone più frequenti.

La trasmissione elettrica eliminando tutti gli inconvenienti che accompagnano necessariamente gli altri sistemi, permette il ritorno all'idea primitiva dell'impiego di grosse macchine fisse, riunendo i vantaggi di una produzione più economica d'energia e di una diminuzione considerevole nel peso del treno, che potrebbe esser ridotto alle sole car-

Digitized by Google

rozze, quando ciascuna di esse fosse, come nell'impianto di Siemens, munita di un ricettore dinamoelettrico. E se a questi vantaggi economici si può aggiungere con un sistema analogo a quello proposto da Ayrton e Perry, l'esclusione quasi assoluta di scontri, si capisce come questa idea della trazione elettrica possa venir considerata seriamente.

Non è certo il caso di pensare ad un cambiamento di sistema nè rapido nè generale. Le ferrovie a vapore sono troppo diffuse, vi sono collegati troppi e troppo grandi interessi, perchè si possa supporre possibile una modificazione così radicale. Ma vi sono molti casi nei quali degli impianti elettrici potrebbero essere attivati utilmente. Il primo che si presenta sono le lunghe gallerie alpine, per le quali si avrebbe il vantaggio di utilizzare le cadute d'aqua sempre abbondanti in quelle regioni elevate, le ferrovie sotterranee, come la Metropolitan Railway di Londra, alla quale si già sta applicando la trazione elettrica vi sarà fra breve senza dubbio attivata, quelle elevate che si tende a introdurre nell'interno delle grandi città per rimediare alla crescente insufficienza delle strade attuali. L'assenza completa di fumo, la leggerezza del materiale, la semplicità del servizio, che esige solo da parte del capotreno il maneggio di un commutatore, possono essere in questi casi degli argomenti decisivi.

Un caso forse più importante e senza dubbio di grande interesse per noi, è l'applicazione della trazione elettrica alle ferrovie di montagna. — A tutti i vantaggi ora enumerati, si aggiunge quello non piccolo della possibilità di impiegarvi l'energia delle cadute d'aqua che abbondano nelle valli e delle quali, anche in quelle più popolate e industriose, si utilizza soltanto una piccola parte, dove le in-

Digitized by Google

dustrie si sviluppano più lentamente di quello che sarebbe portato dalle condizioni economiche per le difficoltà di comunicazioni coi centri consumatori. — Un sistema di ferrovie elettriche che le collegasse alla rete già estesa delle pianure, potrebbe realizzare, per lo meno quanto agli effetti immancabili sullo sviluppo industriale, una delle promesse più ardite e più lontane che è compresa implicitamente nel grande problema della trasmissione elettrica dell'energia; l'utilizzazione dei grandi magazzini naturali d'energia che non possono attualmente essere posti a disposizione dell'industria sempre crescente dei grandi centri.

L'idea non è nuova, e prima che si pensasse alla possibilità di una trasmissione elettrica si tentarono distribuzioni di lavoro meccanico, per mezzo di trasmissioni funicolari, o coll'aria compressa adoperata nei grandi trafori alpini. — Questi sistemi che, in condizioni speciali di distanza o di lavoro, possono dare buoni risultati non si prestano evidentemente ad affrontare il problema generale. — Il moltiplicarsi degli organi di trasmissione nel primo, il rendimento estremamente basso delle macchine nel secondo ne limitano l'impiego entro una cerchia ristretta. La trasmissione elettrica ai vantaggi teorici dell'indipendenza del rendimento dalla distanza fra il generatore e il ricettore, e dalla grandezza della energia trasmessa, aggiunge, come abbiamo visto, quelli di un sistema assolutamente perfetto di distribuzione, e di una versatilità che si domanderebbe invano alle altre forme di energia. — Lo stesso filo che ci somministra l'energia meccanica, può fornirci la luce, il calore, il lavoro chimico solo che si faccia passar la corrente nell'apparecchio trasformatore opportuno, ed è nella riunione delle

Digitized by Google

condizioni richieste dalle varie trasformazioni che sta la vera quistione.

L'impiego su vasta scala della corrente elettrica per la distribuzione a domicilio del lavoro meccanico non può, economicamente, essere separato da quello delle altre forme d'energia, o per lo meno dall'illuminazione. — Per quanto elevati possano essere i valori del coefficente di rendimento elettrico gli è sempre una frazione non troppo grande dell'energia totale che può venir riprodotta negli apparecchi trasformatori. — Il costo dell'unità di lavoro da una parte, dell'unità di luce dall'altra verrebbero ad essere diminuiti quando lo stesso impianto, la stessa canalizzazione potesse somministrar l'uno e l'altro con un lavoro più assiduo ai generatori. L'illuminazione a incandescenza può in tali condizioni diventare davvero economica, e rappresentare nello stesso tempo l'utile reale e copioso di una distribuzione d'energia.

È possibile conciliare, in una sola trasmissione, le condizioni così diverse che si richiedono da queste due trasformazioni, che le esigenze della pratica vogliono assolutamente riunite in un solo insieme?

La trasmissione di grandi somme di lavoro meccanico, a distanze considerevoli, esige assolutamente, per esser fatta in buone condizioni di rendimento, l'impiego di altissime forze elettromotrici. — Le lampade a incandescenza che rappresentano per ora l'unico mezzo possibile di illuminazione applicabile agli usi domestici non possono utilizzare che piccoli salti di potenziale. E non basta; quand'anche si potesse, non si saprebbe come, riuscire a costrurre delle lampade di resistenza enorme, sarebbe conveniente il porre a disposizione dei consumatori dell'energia nelle condizioni ora accennate?

Digitized by Google

Cominciamo prima di tutto da questa seconda parte della questione, sulla quale le idee che si hanno generalmente non brillano certo per molta chiarezza.

Da un conduttore carico scoccano delle scintille tanto più lunghe e poderose quanto più elevato il potenziale e più grande la quantità di elettricità. — Gli effetti violenti di certe scariche potenti, la parentela fra queste e i fenomeni più grandiosi, più tremendi dell'elettricità atmosferica, hanno circondato tutte quante le applicazioni dell'elettricità di un certo sacro terrore che si spinge fino agli innocentissimi fili del telefono. Le disgrazie che non mancarono di accompagnare l'impiego di grandi forze elettro-motrici in alcune applicazioni fatte con macchine Brush, hanno, per così dire, ribadito il chiodo della paura, che constata i fatti dolorosi senza ricercarne completamente le cause. — Ora il pericolo che può derivare dall'impiego di forze elettromotrici elevate dipende da due cause, la più importante delle quali è, si può dire, affatto ignorata da chi non s'occupa in modo speciale di questi argomenti.

La prima precauzione naturale per evitare e i pericoli e i disperdimenti è quella notissima di isolare i fili non solo, ma, per così dire, tutta quanta la trasmissione adoprando come si usa un filo doppio per completar i circuiti anzichè porre, come si pratica negli apparecchi telegrafici uno dei poli in communicazione colla terra. Inoltre la corrente deve essere continua; mentre si possono maneggiare con sicurezza i reofori coperti di uno strato di guttaperca che nel laboratorio di W. De la Rue trasmettono la corrente della sua famosa batteria di 15 mila elementi, con un salto di potenziale di quasi 16 mila Volts, non sarebbe possibile, collo stesso isolamento, reggere in mano i fili quando la cor-

Digitized by Google

rente fosse come quella della dinamo discontinua, peggio ancora se fosse fornito da macchina a corrente alternatamente diretta in senso opposto. — La ragione di alcune disgrazie accadute negli impianti Brush sta appunto specialmente nella grande discontinuità della corrente che si interrompe 8 volte ogni giro, e precisamente nel punto di massimo. Le dinamo derivanti dall'anello Pacinotti o dal gomitolo von Efner Alteneck sono sotto questo rapporto in condizioni assai migliori, e a parità di forza elettromotrice e di isolamento, non darebbero che scosse estremamente più deboli.

Un isolamento accurato e completo della trasmissione potrà dunque permettere di elevare il valore della forza elettromotrice al disopra dei limiti posti dalle apprensioni attuali, tanto più quanto meno sensibili saranno le ondulazioni della corrente. — Se si potesse realizzare praticamente una macchina a corrente assolutamente continua, movendo un conduttore in un campo uniforme e costante delle forze elettromotrici senza paragone più elevate potrebbero venir introdotte senza pericolo. Gli studi e i progressi continui che si fanno nelle sostanze isolanti permettono di sperare che fra non molto il limite inferiore di 200 Volts, fissato in Inghilterra dall'*electric lighting act* per le correnti continue nell'interno delle abitazioni, possa essere elevato di molto senza pericoli e senza apprensioni da parte dei consumatori; le quali andranno senza dubbio scemando di mano in mano che si estenderanno le applicazioni industriali dell'elettricità. Anche attualmente del resto nell'interno delle officine l'uso di correnti di grande forza elettromotrice non presenterebbe maggiori pericoli degli ingranaggi indifesi e delle cinghie.

Il limite del salto di potenziale è invece piuttosto fissato

Digitized by Google

dal sistema di distribuzione, la quale per alimentare le lampade ad incandescenza in modo che siano indipendenti, deve esser fatta per circuiti derivati; la forza elettromotrice fra i due capi del circuito principale a cui si attaccano gli alimentatori non può quindi superare di molto quella richiesta dai singoli apparecchi trasformatori. — Le condizioni di buon rendimento delle lampade a incandescenza sono in diretta opposizione con quelle che abbiamo detto ripetutamente corrispondere al trasporto di lavoro meccanico. È a questo punto che la quistione s'arresta, e che, nello stato attuale delle industrie elettriche, non si sa proporre altra soluzione che quella immaginata da William Thompson al primo apparire degli accumulatori, quando gli splendidi risultati ottenuti dal sommo fisico inglese parevano prometterne una grande diffusione. — Recentemente la medesima idea fu ripresa da Ayrton, il quale, a quanto dice, ne tenta un'esperienza abbastanza grandiosa in Francia sotto gli auspici della compagnia Force et Lumiére proprietaria dei brevetti Faure-Sellon-Volkmar.

Dopo quanto abbiamo detto a proposito di questi apparecchi non si può davvero, per ora, aver grande fiducia nella riuscita economica di una simile impresa, tanto più che gli accumulatori quantunque destinati a rimanere assolutamente fissi non si troverebbero sempre nelle migliori condizioni di lavoro. Ecco del resto, in poche parole, il concetto generale della distribuzione.

L'energia, trasformata dal generatore in una corrente di elevatissima forza elettromotrice, è condotta dalla sorgente lontana per mezzo di fili isolati fino alla città dove si tratta di distribuirla, e quivi passa attraverso una serie grandissima di accumulatori, il cui numero è determinato dalla

Digitized by Google

differenza di potenziale disponibile e dalla forza elettromotrice di ciascun elemento. — Siccome questa è, generalmente di circa 2 Volts si può dire che il numero delle pile secondarie poste in serie sarà circa la metà di quello delle unità di potenziale fra i due capi del circuito del generatore, mentre sarà necessario per le lamine degli accumulatori un numero di chilogrammi di piombo almeno 75 volte più grande di quello che esprime i cavalli-ora da fornirsi ad andamento normale. La lunghissima serie è divisa in tanti gruppi, p. es. di 50 elementi ciascuno, dai quali partono i conduttori principali destinati a fornir la corrente ai ricettori che vi si attaccano su altrettanti circuiti derivati. La grande differenza di potenziale di migliaia di Volts fra i due capi del filo verrebbe dunque ad essere suddivisa in una quantità di piccoli salti quali sono richiesti, p. es., dalle lampade a incandescenza. In un impianto siffatto gli accumulatori possono funzionare in due modi diversi — o da veri serbatoi che, caricati dalla dinamo durante un periodo più o meno lungo, si scaricano poi separatamente, formando ciascuno il proprio circuito indipendente, oppure la scarica avviene contemporaneamente alla carica, la corrente del generatore passa continuamente attraverso la serie completa mentre che, nei conduttori che mettono capo ai vari gruppi, scorre la corrente richiesta dai bisogni del circuito parziale alimentato.

Lasciando da parte le considerazioni generali, per le quali l'introduzione degli accumulatori non può che peggiorare le condizioni di rendimento, aggiungendo alle tante cause di perdita quella considerevole della doppia trasformazione — lasciando star anche di occuparci della variazione probabile del coefficiente di rendimento di questi apparecchi

Digitized by Google

durante un periodo non molto lungo, in entrambe le combinazioni si presentano degli inconvenienti ai quali non si saprebbe come porre rimedio. — La scarica degli accumulatori durante la carica, che richiede l'azione contemporanea di due processi chimici opposti, è senza dubbio una condizione svantaggiosa e per il rendimento e per la durata degli elementi giacchè vi si produrranno con maggiore efficacia le azioni chimiche secondarie di cui accennammo l'influenza perniciosa. — Oltre di che, siccome un accumulatore non può ricevere senza danno una carica superiore ad un limite determinato, bisognerebbe pur provvedere al caso molto frequente in cui, l'attività dei ricettori non esigendo che una piccola parte dell'energia della corrente di carica, l'accumulatore verrebbe in breve tempo a trovarsi in circostanze anormali e il gruppo assorbirebbe dalla corrente principale dell'energia in pura perdita. L'altro sistema della carica e scarica separate richiede un numero di accumulatori almeno doppio di quelli necessari nel primo caso, una spesa quindi doppia di impianto alla quale si dovrebbero aggiungere delle spese pure considerevoli di sorveglianza e di manutenzione perchè si possano sostituire le serie scariche con altrettante caricate senza interrompere il servizio, nè permettere che gli accumulatori lavorino in condizioni sfavorevoli. E tutte queste cause mentre aumenterebbero sensibilmente il costo dell'unità di lavoro fornito, introdurrebbero una serie di difficoltà pratiche di servizio della cui importanza non si può dubitare, quantunque non si possa, per ora, farsene un' idea concreta.

Mentre dunque le conclusioni teoriche che si deducono dalle leggi generali mostrano la possibilità di una trasmissione grandiosa di lavoro meccanico con rendimenti ele-

Digitized by Google

vati la soluzione pratica del grande problema è ancora irta di difficoltà fino ad ora insuperate, le quali probabilmente non saranno spianate del tutto che quando sia risolta vittoriosamente quella dell'accumulamento dell'energia in condizioni industriali.

L'impossibilità, per lo meno nello stato attuale, di applicare su vasta scala la distribuzione in serie, la mancanza di accumulatori veramente pratici che permettano la suddivisione del salto di potenziale fra i capi del filo trasmettitore, rendono per il momento assai incerto il risultato economico di un trasporto di energia destinato all'industria e non si potrebbe certamente consigliarne un tentativo ad un'impresa che avesse di mira, come è naturale, di ritrarre dei benefizi dai capitali impiegati. E non è solo una trasmissione completa e su vasta scala che risenta della mancanza di buoni accumulatori; anche le distribuzioni parziali come quelle di luce già attivata dalla società Edison cogli apparecchi del celebre americano si trovano per questa ragione in condizioni economiche tutt'altro che splendide, poichè il prezzo della luce deve essere mantenuto assai elevato per trovare un compenso alle grandi spese di impianto. Le lampade attualmente non possono essere accese che durante l'attività del generatore il cui funzionamento in condizioni normali è necessariamente limitato a poche ore al giorno, ed il servizio non può essere fatto in condizioni veramente pratiche, paragonabili a quelle del gas, giacchè non si può pretendere che, per soddisfare ai bisogni eventuali di un consumatore, l'impresa che fornisce la corrente si obblighi a mantenere continuamente in moto una macchina potente in pura perdita. L'applicazione degli accumulatori, avrebbe il doppio vantaggio di diminuire con-

Digitized by Google

siderevolmente l'importanza delle spese di impianto permettendo un lavoro più assiduo, ed anche continuo dei generatori, e di soddisfare nel medesimo tempo più completamente alle esigenze di un servizio di illuminazione.

Se però la soluzione generale del problema non si può ancora supporre molto vicina la trasmissione elettrica del lavoro meccanico può essere anche ora vantaggiosa in molti casi. La possibilità di costruire i ricettori dinamoelettrici di dimensioni svariatissime dal microscopico motore Griscom che si serra nel pugno, ed assorbe un'energia di meno di $^1/_{10}$ di cavallo, alle macchine colossali Ferranti-Thompson destinate ad alimentare 25,000 lampade Swan, col consumo continuo dell'energia di 2500 cavalli; l'effetto utile elevato di tutti questi motori il cui valore risente assai meno che negli altri l'influenza della somma di energia trasformata, il loro peso che può essere assai piccolo in confronto al lavoro che sono capaci di fornire e quindi la possibilità di rendere mobili degli ordigni lavoratori di grande potenza applicandovi direttamente il motore al quale l'energia è somministrata da una coppia di fili flessibili, possono offrire molti vantaggi inaspettati, rendere possibile l'applicazione del lavoro meccanico là dove adesso non può penetrare che la mano dell'uomo. S'aggiunga a tutto questo la facilità di regolarne lo sforzo e la marcia con un gioco semplicissimo di commutatore, la soppressione assoluta degli alberi di trasmissione costosi, ingombranti, che, specialmente nel caso di macchine operatrici che richiedono grande velocità, assorbono una somma non indifferente di energia, soppressione che produrrebbe come conseguenza necessaria un' economia sensibile nelle costruzioni, si capirà facilmente come l'impianto di trasmis-

Digitized by Google

sioni elettriche possa essere realmente un progresso e si possa affermare che si andrà diffondendo.

Di tutti questi vantaggi si potrebbe approfittare anche attualmente quando la distribuzione non abbracciasse una zona troppo vasta, ed un motore potente centrale fornisse, trasformata in corrente elettrica, l'energia ad un gruppo di opifici dove l'illuminazione fatta con un sistema ben inteso di lampade ad arco a luce diffusa permettesse la distribuzione economica in serie dei ricettori alimentati direttamente dal generatore centrale mentre che delle batterie di accumulatori, caricati durante le ore di riposo, potrebbero con una canalizzazione speciale alimentare delle lampade ad incandescenza, dove l'uso di queste fosse richiesto. L'estensione limitata della distribuzione porrebbe l'impianto nelle condizioni opportune per ridurre al minimo il costo del lavoro fornito con rendimenti elettrici molto superiori al 50 %, limite dal quale come abbiam visto, parlando del rendimento industriale di una trasmissione di lavoro meccanico, non potrebbe molto allontanarsi un trasporto elettrico di energia, quando fosse assai grande la distanza da superarsi in confronto alla massima della forza elettromotrice, che le condizioni attuali permettano di raggiungere nei generatori di corrente, senza aumentare eccessivamente il costo dell'unità di lavoro fornito. Il massimo valore possibile di forza elettromotrice potrebbe poi, quando l'impianto fosse fatto colle debite cure, venir impiegato senza che i pericoli diventino maggiori di quelli che circondano attualmente gli ingranaggi e le trasmissioni.

È nello sviluppo logico, opportuno, degli impianti parziali che si potranno tentare le esperienze decisive, trovare forse dei nuovi elementi che aiutino la soluzione completa; la

Digitized by Google

quale se è già passata dal campo delle utopie a quelle dell'indagine scientifica seria, se venne coordinata alle leggi generali, attende ancora dagli studi sperimentali la sanzione definitiva di una possibilità pratica le cui condizioni non si potranno realizzare che quando le applicazioni isolate avranno spianata la via.

FINE.

Digitized by Google

Digitized by Google

Presso gli stessi Editori

Berthelot (Marcellino). *La sintesi chimica.* Milano 1877, 1 vol. in-8 di XXXI-310 pagine . . . . . L. 6 —

Blaserna (Pietro). *La teoria del suono nei suoi rapporti colla musica.* Dieci conferenze. Milano 1875, 1 vol. in-8 di VI-174 pagine con 36 figure intercalate nel testo . . . . . 5 —

Cooke Gloria (P. Jr). *La nuova chimica.* Milano 1877, 1 vol. in-8 di XVI-343 pagine con figure intercalate nel testo . . . . . 6 —

Dall'Oppio (Luigi). *L'Ozono.* Appunti critici ed alcune esperienze. Bologna 1875, di V-107 pagine. . . . . 3 —

Dupuis (J.). *Table des logarithmes d'addition et de soustraction.* Milano, 1 vol. in-16 di 27 pagine . . . . . 1 —

Ferrini (R.) e **Pogliaghi** (P.). *La luminosità elettrica dei gaz e la materia radiante.* Milano 1882, 1 vol. in-8 di XV-315 pagine con 3 tavole e 55 figure intercalate nel testo. . . . . 6 —

Garbieri (Giovanni). *I determinanti con numerose applicazioni.* Parte prima, utile agli studiosi di matematica nei primi corsi universitarii. Bologna 1875, 1 vol. in-8 . . . . . 6 —

Lockyer (J. Norman). *Studi di analisi spettrale.* Milano 1879. 1 vol. in-8 di XII-236 pagine con 9 tavole colorate e 51 figure intercalate nel testo . . . . . 7 —

Mateovich (Paolo). *Avviamento alla analisi chimica qualitativa pei corpi organici*, ad uso degli esercizi pratici nei laboratori. Milano 1880, 1 vol. in-8 di 53 pagine 1 25

Padelletti (Dino). *Regolatori a forza centrifuga.* Firenze 1875, 1 vol. in-8 con 2 grandi tavole. . . . . 3 —

Privat-Deschanel (A.) e **Pichot** (J.). *Trattato elementare di fisica.* Opera destinata alle scuole secondarie, alle normali ed alla coltura generale, illustrata da moltissime incisioni nel testo e da una tavola cromolitografica con molte aggiunte originali destinate a porla al corrente colle ultime scoperte. Versione italiana con molte aggiunte e note, appendici alla meccanica ed alla meteorologia del dott. *A. A. Pozzi.* Seconda edizione riveduta ed ampliata. Milano 1883, 1 vol. in-8 di VI-786 pagine . . . . . 6 —

Schutzenberger (P.). *Le fermentazioni.* Milano 1876, 1 vol. in-8 di 326 pagine con 28 figure intercalate nel testo . . . . . 6 —

Selmi (A.). *Il miasma palustre.* Lezioni di chimica igienica date nell'Istituto Tecnico Provinciale di Mantova. Seconda edizione. Padova 1873, 1 vol. in-16 di 132 pagine. 1 50

— *Igiene dell'aria nei luoghi d'abitazione privata e di pubblico convegno.* Padova 1871, 1 vol. in-16 di 96 pagine . . . . . 1 —

Sergi (G.). *Fisiologia e psicologia del colore.* Conferenza tenuta alla Lega per l'istruzione degli insegnanti, in Bologna addì 18 gennaio 1881. Milano 1881, 1 vol. in-8 di 35 pagine . . . . . 1 —

Vogel (Ermanno). *Gli effetti chimici della luce e la fotografia nelle loro applicazioni alla scienza, all'arte e all'industria.* Milano 1876, vol. in-8 di VIII-298 pagine con 94 figure intercalate nel testo. 6 —

Wurtz (Ad.). *La teoria atomica.* Milano 1879, 1 vol. in-8 di VII-318 pagine con una tavola . . . . . 6 —

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

ALTRE RECENTI PUBBLICAZIONI RISGUARDANTI LE SCIENZE FISICHE

Privat-Deschanel (A.) e **Piehot** (J.). Trattato elementare di fisica. Opera destinata alle scuole secondarie, alle normali ed alla coltura generale, illustrata da 707 incisioni nel testo e da due tavole cromolitografiche con molte aggiunte originali destinate a porla al corrente colle ultime scoperte, e corredata di un' appendice sulla Meccanica, secondo i programmi governativi, per cura del dott. *A. A. Pozzi*. Seconda ediz. riveduta ed aumentata. Milano 1882, 1 vol. in-8 di pag. 831. L. 4 –

Balfour (Stewart). L'energia. Sue forme, sue leggi, sua conservazione. Che cosa è la forza? per *P. di Saint-Robert*. Correlazione della forza vitale colle forze fisiche e chimiche, per *G. Le Conte*. Correlazione della forza nervosa colla forza mentale, per *A. Bain*. Milano 1875, 1 vol. in-8 di XVIII-255 pagine con figure intercalate nel testo . . . . . 5 –

Blaserna (Pietro). La teoria del suono nei suoi rapporti colla musica. Dieci conferenze. Milano 1875, 1 vol. in-8 di pag. VI-174, con 36 fig. intercalate nel testo. 5 –

De Rossi (Michele Stefano). La Meteorologia endogena. Milano 1879-82 2 vol. in-8 di compl. pag. XXVII-800, con 9 tavole litografate e molte figure. . . . . 14 –

Lockyer (J. Norman). Studi di analisi spettrale. Milano 1879, 1 vol. in-8 di XII-256 pagine con 9 tavole colorate e 51 figure intercalate nel testo . . . . . 7 –

Secchi (P. A.). Le Stelle. Saggio di astronomia siderale. Milano 1878, 1 vol. in-8 di VIII-125 pagine con 8 tavole colorate e 78 figure intercalate nel testo . . 12 –

Tyndall (J.). Le forme dell'acqua. Nubi e Fiumi, Ghiaccio e Ghiacciaj. Preceduto da due discorsi e da una Lettera dell'On. Comm. *Quintino Sella*, e seguito da una Conferenza, una Memoria ed una Lettera sul medesimo argomento di *H. Helmholtz* colla risposta di *J. Tyndall*. Milano 1877, 1 vol. in-8 di XII-316 pagine con molte figure intercalate nel testo . . . . . 6 –

Vogel (Ermanno). Gli effetti chimici della luce e la fotografia nelle loro applicazioni alla scienza, all'arte e all'industria. Milano 1876, 1 vol. in-8 di VIII-298 pag. con 59 figure intercalate nel testo . . . . . 6 –

Wurtz (Ad.). La teoria atomica. Milano 1879, 1 vol. in-8 di VII-318 pagine con una tavola . . . . . 6 –

Alglave (Em.) et **J. Boulard**. La lumière électrique. Son histoire, sa production, son emploi, etc. Orné de 182 fig. dans le texte et 24 hors texte. Paris 1882, 1 vol. di pag. XIX-464 . . . . . 12 –

Devillez (A.). Traité élémentaire de la chaleur au point de vue de son emploi comme force motrice. Tome I. Mons 1881, in-8, de pag. 544, avec planches . . . . 10 –

Guillemin (Amédée). Le monde physique. Paris 1880-82, gr. in-8, avec planches et vignettes dans le texte ou hors du texte. L'ouvrage se composera d'environ 25 livraisons, soit 4 beaux vols. Chacun de ces vols., comprenant une ou plusieurs parties de la science physique, formera un tout complet et se vendra séparément. Prix des 10 séries (98 livraisons) déja publiées . . . . . 70 –

Hospitalier (E.). La physique moderne. — Les principales applications de l'électricité. 2e Édition entièrement refondue, avec 130 fig. dans le texte et 4 pl. hors texte. Paris 1882, gr. in-8, de pages VIII-325 . . . . . 12 –

Lachèz (Théod.). Acoustique et optique des salles de réunions. Paris 1879, in-8 de pages XX-518, avec fig. dans le texte. . . . . 12 –

Tissandier (Gaston). Les récréations scientifiques ou l'enseignement par les jeux. 2e Édition entièrement refondue, avec 225 grav. dans le texte. Paris 1881, gr. in-8 de pages XII-337 . . . . . 12 –

Sawyer (William Edward). Electric lighting by incandescence, and its application to inferior illumination. A practical treatise. With 96 illustrations. New-York 1881, in-8, di pag. 189, legato in tela . . . . . 16 –

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

YB 75207

Digitized by Google

Digitized by Google